



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

**“CALIDAD ALIMENTARIA DE LENTEJA (*Lens culinaris* M.)
VARIEDADES VERDE Y ROJA EXTRUÍDAS”**

TESIS

QUE PRESENTA

Q.F.B. EDER NOÉ NAMBO SANTIAGO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Directora de Tesis
Dra. Berenice Yahuaca Juárez**

Morelia, Michoacán, Abril. 2024

El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Biotecnología “M.C. Víctor Manuel Rodríguez Alcocer” de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección de la Dra. Berenice Yahuaca Juárez.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado en este proyecto.
- Al Laboratorio de Biotecnología “M.C. Víctor Manuel Rodríguez Alcocer” de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH y el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) unidad Querétaro por las facilidades prestadas para la realización de la presente Tesis.
- Con admiración y respeto a mi directora de Tesis, por su confianza y apoyo, la Dra. Berenice Yahuaca Juárez.
- A quienes conformaron mi comité de Tesis: Dra. Consuelo de Jesús Cortés Penagos, Dr. José Herrera Camacho, Dr. Juan Carlos González Hernández y Dr. Pedro Antonio García Saucedo, por su tiempo, conocimiento y observaciones indispensables para la correcta elaboración de este proyecto.

DEDICATORIA

- A mis padres Daniel y Ofelia, por su apoyo y motivación, porque siempre podré contar con ustedes.
- A mi novia Karla, por su amor y apoyo incondicional, porque siempre avanzamos juntos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN GENERAL.....	- 1 -
ABSTRACT	- 2 -
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	- 3 -
II. JUSTIFICACIÓN.....	- 6 -
III. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	- 8 -
IV. HIPÓTESIS.....	- 8 -
V. OBJETIVOS.....	- 8 -
5.1. Objetivo General	- 8 -
5.2. Objetivos Específicos	- 8 -
VI. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.....	- 9 -
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 10 -
CAPÍTULO I. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la semilla de lenteja verde y roja.....	- 11 -
1.1 Resumen.....	- 11 -
1.2 Estado del Arte.....	- 12 -
1.3 Objetivo	- 18 -
1.4 Materiales y Métodos	- 18 -
1.5 Resultados y discusión.....	- 23 -
1.6 Conclusión	- 29 -
1.7 Referencias Bibliográficas.....	- 29 -
CAPÍTULO II. Determinación del efecto de la extrusión sobre las propiedades nutrimentales y de actividad fisiológica en la harina de lenteja verde y roja.....	- 33 -
2.1 Resumen.....	- 33 -
2.2 Estado del Arte.....	- 34 -
2.3 Objetivo	- 44 -

“

2.4 Materiales y métodos	- 44 -
2.5 Resultados y discusión.....	- 51 -
2.6 Conclusión	- 61 -
2.7 Referencias bibliográficas	- 62 -
CAPÍTULO III. Determinación de la calidad tecno-funcional en harina de lenteja de dos variedades extruidas	- 67 -
3.1 Resumen.....	- 67 -
3.2 Estado del Arte.....	- 68 -
3.3 Objetivo	- 74 -
3.4 Materiales y Métodos	- 74 -
3.5 Resultados y discusión.....	- 77 -
3.6 Conclusión	- 92 -
3.7 Referencias bibliográficas	- 92 -
Perspectivas y/o Recomendaciones.....	- 99 -
Anexos.....	- 100 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis químico proximal de la lente verde y roja (crudas) en base seca.....	- 24 -
Tabla 2 Color de la lente verde y roja (crudas enteras).	- 28 -
Tabla 3 Contenido de proteína en harina de lenteja extruida (90 y 130 °C).	- 52 -
Tabla 4 Determinación de índice glucémico en harina de lenteja verde y roja extruida (90 y 130 °C).	- 54 -
Tabla 5 Determinación de carga glucémica en harina de lenteja cruda, cocida y extruida (90 y 130 °C).	- 56 -
Tabla 6 Contenido de fibra dietaria total, soluble e insoluble en harina de lenteja cruda y cocida.	- 58 -
Tabla 7 Cuantificación de polifenoles totales y actividad antioxidante en harina de lenteja cruda y cocida.	- 60 -
Tabla 8 Índice de absorción de agua e índice de solubilidad de agua en harina de lenteja extruida.....	- 78 -
Tabla 9 Determinación de color en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida.-	80 -
-	
Tabla 10 Dureza, cohesión y adhesión en harina de lenteja rehidratada.	- 83 -
Tabla 11 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecnofuncionales en harina de lenteja verde y roja cruda, cocida por ebullición y extruida (90 y 130 °C).	- 89 -
Tabla 12 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecnofuncionales en harina de lenteja verde extruida (90 y 130 °C).	- 90 -
Tabla 13 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecnofuncionales en harina de lenteja roja extruida (90 y 130 °C).	- 91 -
Tabla 14 Extracción proteica en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.	- 100 -
Tabla 15 Polifenoles totales en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.-	100 -
Tabla 16 Índice de absorción de agua en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.	- 101 -
Tabla 17 Índice de solubilidad de agua en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.	- 102 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Características de las variedades de lenteja verde y roja (<i>Lens culinaris</i> M.).	- 15 -
Figura 2 Protocolo para la determinación de fibra dietaria total, soluble e insoluble por método enzimático gravimétrico en harina de lenteja verde.....	- 48 -
Figura 3 Micrografías a 500x de harina de lenteja extruida y los controles 1 y 2 (cruda y cocida por ebullición).	- 86 -
Figura 4 Micrografías de harina de lenteja verde y roja extruida y los controles 1 y 2 (cruda, cocida por ebullición).	- 88 -

RESUMEN GENERAL

La extrusión es un proceso mecánico que permite modificar las propiedades de las matrices alimentarias. La lenteja puede transformarse por extrusión a harina, mejorando su composición nutricional, aumentando su digestibilidad y promoviendo cambios en sus propiedades tecno-funcionales. Además, posibilita la obtención de productos con diferentes texturas, formas, sabores y tamaños. Por lo cual, el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la extrusión sobre la calidad alimentaria de la lenteja (*Lens culinaris* M.) verde y roja. La harina de lenteja fue extruida a 90 y 130 °C, los controles fueron: 1. Harina de lenteja cruda y 2. Harina de lenteja cocida (94 °C/15 min lenteja verde y 5 min para la roja). Se determinaron las propiedades nutricionales (proteína, carga CG e índice glucémico IG), actividad fisiológica (fibra dietaria total FDT, soluble FDS e insoluble FDI, polifenoles totales PT y actividad antioxidante AOX) y tecno-funcionalidad (dureza, cohesión, adhesión, microscopia electrónica de barrido MEB, índice de absorción IAA y solubilidad ISA de agua). El control 1 (verde y roja) presentó el mayor contenido de PT (83.52 y 56.69 mg AG/100g), AOX: ABTS+ (75.70 y 58.80 % de inhibición) y DPPH• (78.33 y 54.69 % de inhibición) y de proteína (19.19 y 17.21 %) comparado con el control 2 y extrusión a 90 y 130 °C; sin embargo, la extrusión a 90 °C, en ambas variedades de lenteja, no presenta diferencia significativa ($\alpha=0.05$) con el control 1 y es superior a los valores obtenidos con respecto al control 2. En FDT, FDS y FDI, la extrusión a 130 °C presento un mayor contenido en harina de lenteja verde (52.82, 12.37 y 40.44 %) y roja (42.02, 9.69 y 32.32 %) con respecto a 90 °C y sus controles. El ÍG y CG en harina de lenteja roja y verde extruidas fueron superiores a los controles 1 y 2; sin embargo, entre ambas variedades en un mismo tratamiento no hubo diferencia significativa ($\alpha=0.05$). Hubo un incremento de dureza en harina extruida a 90 y 130 °C de lenteja verde (22.72 y 30.20 N) y roja (21.01 y 24.39 N) con respecto a sus controles 1 y 2. La cohesión y adhesión en las harinas extruidas de lenteja verde y roja fueron menores a los controles. El ÍAA en harina de lenteja roja extruida (90 y 130 °C) fue de 4.76 y 5.60 g de gel/d, superior al de la variedad verde (4.68 y 5.26 g de gel/d); sin embargo, ambas variedades presentaron diferencia significativa ($\alpha=0.05$) con respecto a sus controles 1 y 2. El ISA fue mayor en los tratamientos empleados y los controles en la harina de lenteja roja (19.19, 9.71, 14.86 y 9.15 %) que la variedad verde (15.28, 8.93, 13.98 y 8.50 %). La MEB evidenció la formación de complejos entre los cuerpos proteicos y gránulos de almidón en la harina de lenteja extruida. En conclusión, la extrusión a 130°C mejora las propiedades tecno-funcionales.

Palabras clave: extrusión, matriz alimentaria, propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcional.

ABSTRACT

Extrusion is a mechanical process that allows modifying the properties of food matrices. The lentil can be transformed by extrusion into flour, improving its nutritional composition, increasing its digestibility and promoting changes in its techno-functional properties. In addition, it makes it possible to obtain products with different textures, shapes, flavors and sizes. Therefore, the objective of this work was to determine the effect of extrusion on the nutritional quality of green and red lentils (*Lens culinaris* M.). The lentil flour was extruded at 90 and 130 °C, the controls were: 1. Raw lentil flour and 2. Cooked lentil flour (94 °C/15 min for green lentil and 5 min for red lentil). The nutritional properties (protein, CG load and glycemic index GI), physiological activity (total dietary fiber TDF, soluble FDS and insoluble FDI, total polyphenols PT and AOX antioxidant activity) and techno-functionality (hardness, cohesion, adhesion, microscopy) were determined. SEM, absorption index IAA and water solubility ISA). Control 1 (green and red) presented the highest content of PT (83.52 and 56.69 mg AG/100g), AOX: ABTS+ (75.70 and 58.80 % inhibition) and DPPH• (78.33 and 54.69 % inhibition) and protein (19.19 and 17.21 %) compared to control 2 and extrusion at 90 and 130 °C; However, extrusion at 90 °C, in both lentil varieties, does not present a significant difference ($\alpha=0.05$) with control 1 and is higher than the values obtained with respect to control 2. In FDT, FDS and FDI, the Extrusion at 130 °C presented a higher content of green (52.82, 12.37 and 40.44%) and red (42.02, 9.69 and 32.32%) lentil flour compared to 90 °C and its controls. The GI and GL in extruded red and green lentil flour were higher than controls 1 and 2; However, between both varieties in the same treatment there was no significant difference ($\alpha=0.05$). There was an increase in hardness in flour extruded at 90 and 130 °C of green (22.72 and 30.20 N) and red (21.01 and 24.39 N) lentils with respect to their controls 1 and 2. Cohesion and adhesion in extruded lentil flours green and red were lower than the controls. The IAA in extruded red lentil flour (90 and 130 °C) was 4.76 and 5.60 g of gel/d, higher than that of the green variety (4.68 and 5.26 g of gel/d); However, both varieties presented a significant difference ($\alpha=0.05$) with respect to their controls 1 and 2. The ISA was higher in the treatments used and the controls in the red lentil flour (19.19, 9.71, 14.86 and 9.15%) than the green variety (15.28, 8.93, 13.98 and 8.50%). The SEM showed the formation of complexes between the protein bodies and starch granules in the extruded lentil flour. In conclusion, extrusion at 130°C improves the techno-functional properties.

Keywords: extrusion, food matrix, nutritional properties, physiological and techno-functional activity.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En términos de seguridad alimentaria, actualmente existe un marcado interés por destacar e incorporar a la dieta de la población nuevas fuentes de proteínas, alternas a las procedentes de productos cárnicos, con el objetivo de disminuir la desnutrición que enfrentan algunos sectores de la población, específicamente los niños. Una dieta balanceada aporta los nutrientes necesarios para que el organismo lleve a cabo correctamente sus funciones, ya que los alimentos contienen compuestos con efectos fisiológicos que benefician al cuerpo humano (Delgado-Andrade et al., 2016). Hoy en día hay un marcado interés en el desarrollo de investigaciones en torno al aporte nutricional y funcional de los alimentos, que además de cumplir con la función de satisfacer la necesidad de “comer”, sean alimentos que aporten en la nutrición básica con beneficio a la salud. Existen indicios que muestran que cada vez más las personas adquieren alimentos y bebidas nutritivas y funcionales, el estilo de vida actual ha conducido a que se seleccionen productos con propiedades que incrementan el aporte proteico, reducen el colesterol sérico, prevengan enfermedades obstructivas coronarias (ateroesclerosis) y que retrasen el envejecimiento celular, así como los productos vinculados con el control de hipertensión, prevención del cáncer de colon y desarrollo de *Diabetes Mellitus* (Ahmed et al., 2015), entre otras. La Organización Mundial de Salud recomienda llevar una dieta equilibrada y saludable constituida por frutas verduras, cereales integrales y legumbres (IMSS, 2015).

En México, histórica y tradicionalmente el cultivo de legumbres es relevante, se consume en mayor medida frijol, haba, garbanzo y lenteja. De estas legumbres, Michoacán es el principal productor de lenteja con un 90 % de la producción nacional (SIAP, 2020). Nutricionalmente la lenteja (*Lens culinaris* M.) aporta 23 % en proteína, siendo la segunda después de la soya. En cuanto a micronutrientes, posee calcio, hierro, magnesio, zinc, sodio, potasio, fósforo, selenio, vitaminas B1, B2, B6, C, A, folato, niacina y compuestos fenólicos (López-Muñoz et al., 2020) además de compuestos con actividad fisiológica como fibra dietaria, carbohidratos digeribles e indigeribles y compuestos bioactivos como los polifenoles. No obstante, las legumbres también se caracterizan por contener sustancias bioactivas identificadas como factores o compuestos anti-nutricios (Inhibidores de proteasas, inhibidores de amilasa, oligosacaridos y taninos), estos compuestos afectan el valor nutricional de los alimentos, ya que dificultan o inhiben la

“ asimilación de nutrientes, como proteínas y minerales (Arqueroz, 2023) provocando una baja absorción o limitada digestión, causa de distensión abdominal y flatulencias.

La lenteja aun siendo de alto cultivo en la República Mexicana a través de Michoacán, su consumo es menor en comparación al frijol, cuyo consumo *per cápita* anual es de 11 Kg y un consumo semanal del 74 % (5 días a la semana). Lo anterior puede deberse a las costumbres culinarias de la población (SADER, 2015), a la falta de variantes para su preparación y consumo (Aguilar-Valenzuela et al., 2011) dado el estilo de vida actual, en el que se prefieren alimentos de fácil y rápida preparación. También puede deberse a su limitada digestibilidad, provocando una sensación de incomodidad corporal, y entre otros, que los consumidores buscan opciones que sean atractivas tanto en sabor como en nutrientes.

Tomando en cuenta lo anterior, es crucial buscar formas de aumentar la variedad en la manera en que se utiliza y consume la lenteja, con el objetivo de aprovechar sus propiedades nutricionales, fomentando la soberanía y sostenibilidad alimentaria. Esto se puede lograr desarrollando productos alimentarios que sean fáciles y rápidos de preparar, de mejor digestibilidad y que resulten atractivos para el consumidor. Otra opción es obtener productos a partir de la lenteja que puedan utilizarse como matriz alimentaria, para la elaboración de otros alimentos. Entre ellos destaca la obtención de pulverizados de lenteja (harina) que sean de uso relativamente fácil para incorporarse en la preparación y diseño de alimentos. El pulverizado de lenteja es una de las matrices alimentarias en las cuales se ha trabajado en los últimos años, obteniendo como producto final harina, utilizada como materia prima para la elaboración de otros productos alimenticios o como sustituto de otras harinas, como la de trigo, para mejorar sus características nutricionales. La harina de lenteja puede ser utilizada en diversas industrias, como la panadería, la producción de bebidas fermentadas y la elaboración de pastas, entre otras opciones (Sánchez-García, 2023).

La harina de legumbres puede obtenerse mediante diversos procedimientos que involucran tratamientos como: cocción hidrotérmica tradicional, imbibición, germinación y extrusión. Cada proceso en mayor o menor medida puede generar cambios en las propiedades nutrimentales y tecno-funcionales de las semillas (Oblitas, 2017). La extrusión, es una tecnología emergente que consiste en aplicar calor y presión a la matriz alimentaria durante un periodo de tiempo

corto, utilizando un extrusor. La matriz alimentaria a extruir se coloca en un tubo, donde se regula la temperatura mediante resistencias eléctricas. Un tornillo helicoidal transporta el material, el cual se deforma por la fricción ejercida a lo largo del tubo. Al final, el material deformado sale por una boquilla o dado otorgándole la forma deseada (Blanco, 2017). Algunas de las ventajas que ofrece la extrusión es la inactivación de enzimas, microorganismos y sustancias indeseables que sean poco resistentes al calor, beneficiando al alimento, ya que estas sustancias pueden propiciar el deterioro de estos, hacerlos menos estables en el almacenamiento o reducir su valor nutricional (Sánchez-García, 2023). La extrusión permite eliminar compuestos anti-nutricios presentes en la lenteja, como inhibidores de proteasas y amilasa, oligosacáridos y taninos (Sánchez, 2014).

La extrusión además es una alternativa para diversificar la presentación de los alimentos, ya sea a partir de ingredientes básicos o bien por la mezcla de estos con otras matrices alimentarias, obteniendo alimentos de diversas formas, tamaños, texturas, colores y olores, características que están relacionadas con las propiedades tecno-funcionales de las matrices alimentarias. Las propiedades tecno-funcionales son todas las propiedades no nutricionales principalmente relacionadas con la textura del alimento, su comportamiento durante el procesamiento y almacenamiento (Bala, Kinabo y Uebersa, 2022).

La lenteja (*Lens culinaris* M.) es una legumbre que forma parte de los recursos agroalimentarios de consumo habitual, con tradición cultural y soberanía alimentaria. Las lentejas crecen en vainas y contienen semillas planas y pequeñas en su interior. Existen distintas variedades de lentejas, marrones, verdes, rojas, amarillas y negras Beluga. Es importante mencionar que el aporte nutrimental depende de la variedad de lenteja que se trate (SADER, 2023). En la actualidad, las legumbres representan una oportunidad para establecerse como sustitutos o complemento en matrices alimentarias para la elaboración de alimentos, al aportar beneficios nutrimentales y poseer propiedades tecno-funcionales importantes. La extrusión es una alternativa para el procesamiento de legumbres como la lenteja. Por lo que es fundamental identificar el efecto que dicho procesamiento tiene sobre sus propiedades nutrimentales y tecno-funcionales.

II. JUSTIFICACIÓN

Las legumbres tienen propiedades que favorecen a la salud humana, son de fácil adquisición y de calidad nutricional, sus componentes son capaces de disminuir el riesgo de desarrollar enfermedades como cáncer, aterosclerosis, hipertensión, además de la *Diabetes Mellitus*. La lenteja (*Lens culinaris* M.) es una legumbre que forma parte de los recursos agroalimentarios mexicanos de consumo habitual, con tradición cultural y soberanía alimentaria. Existen diferentes variedades de lentejas que se distinguen por su color: amarillo, naranja, rojo, verde, marrón y negro. Siendo la variedad verde la que se produce principalmente en México, teniendo el 90 % de la producción el estado de Michoacán, otras variedades como la roja se ha introducido en el mercado mexicano mayormente por importación (SADER, 2023). Con respecto a otras legumbres posee un alto contenido de proteína biodisponible y compuestos bioactivos (polifenoles y antocianinas) convirtiéndola en un alimento nutricionalmente valioso. Sin embargo, también contiene compuestos anti-nutricionales que son sustancias de origen natural generadas en el metabolismo secundario como mecanismo de defensa contra depredadores o bajo estrés, estos compuestos pueden afectar el valor nutricional de los alimentos, ya que dificultan o inhiben la asimilación de nutrientes (proteínas y minerales) (García y Serrano, 2020).

En los últimos años, en México a través de Michoacán, la producción de lenteja ha cobrado importancia, esta se destina mayoritariamente al consumo en forma de menestra; no obstante, a consecuencia del cambio en el estilo de vida entre otros factores, los consumidores han disminuido su adquisición. En este sentido es importante implementar alternativas de consumo y uso de la lenteja (*Lens culinaris* M.), ejemplo de ello es el producto pulverizado (harina), el cual puede incorporarse en procesos para el desarrollo de diversas matrices alimentarias.

La extrusión es una tecnología emergente alternativa mediante la cual puede transformarse la lenteja para utilizarse como matriz alimentaria (Olmedilla et al., 2010). Esta tecnología es un proceso mecánico, que a través de presión y temperatura modifica las estructuras internas de los alimentos permitiendo obtener productos con mejora en su composición nutrimental y tecnofuncional. Investigaciones indican que la extrusión en la lenteja incrementa su contenido en fibra dietaria, por la temperatura empleada puede presentarse una variación en el contenido de

“
antioxidantes y vitaminas, aumenta la digestibilidad proteica y promueve la eliminación de compuestos anti-nutricionales, como los inhibidores de proteasas, inhibidoras de amilasa, oligosacáridos y taninos (Blanco, 2017). Siendo la extrusión una opción viable para desarrollar harina de lenteja que permita diversificar matrices alimentarias al sustituir o complementar los alimentos conservando su calidad alimentaria (Arqueroz, 2023). Considerando lo anteriormente expuesto, es importante determinar el efecto de la extrusión sobre la calidad nutricional y tecnofuncional de la lenteja y la relación que guarda con la variedad de la legumbre.

III. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo se puede promover un incremento en la calidad de las propiedades tecno-funcionales, nutricionales y de actividad fisiológica de la harina de lenteja (*Lens culinaris* M.) de dos variedades con respecto al proceso de cocción tradicional de la legumbre?

IV. HIPÓTESIS

La aplicación del proceso de extrusión a la harina de lenteja incrementa la calidad tecno-funcional, nutricional y de actividad fisiológica de la harina en comparación con la harina de lenteja cruda y de lenteja cocida hidro-térmicamente. Además, se sugiere que la calidad alimentaria de la harina de lenteja extruida está directamente influenciada por la variedad de la legumbre utilizada en el proceso.

V. OBJETIVOS

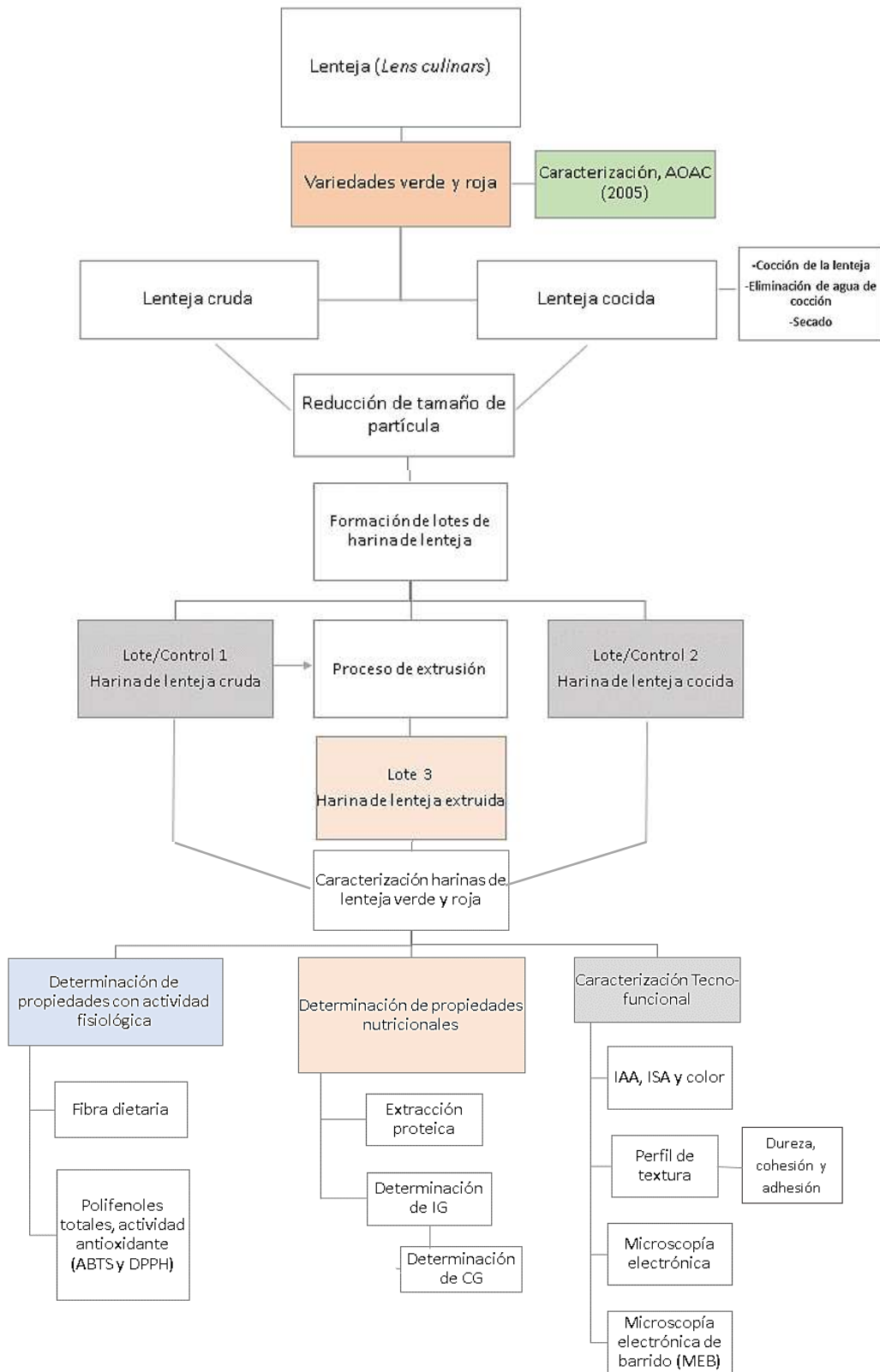
5.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la extrusión sobre la calidad alimentaria de la harina de lenteja (*Lens culinaris* M.) verde y roja.

5.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas a la semilla de lenteja variedades verde y roja.
2. Desarrollar el protocolo de extrusión para la obtención de harina de las dos variedades de lenteja seleccionadas.
3. Determinar el efecto de la extrusión sobre las propiedades nutrimentales y de actividad fisiológica en la harina de lenteja verde y roja extruidas.
4. Evaluar la calidad tecno-funcional de la harina de dos variedades de lenteja extruidas.
5. Determinar la correlación entre las propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcionales de la harina de lenteja verde y roja extruidas.

VI. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL



VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión derivados del presente proyecto de investigación se abordarán a través de tres capítulos, cada capítulo es referido a los objetivos planteados, en cada uno se incluye: resumen, estado del arte, objetivo, materiales y métodos, diseño y análisis estadístico, resultados y discusión, conclusión y referencias bibliográficas. A continuación, se describen los capítulos:

Capítulo I. Referente a la caracterización de las semillas de lenteja, se llevó a cabo un análisis químico proximal de la lenteja (*Lens culinaris* M.) de dos variedades: variedad roja marca Lima Limón® y variedad verde marca Verde Valle®. se determinó humedad (calentamiento directo), cenizas (incineración), extracto etéreo (método Soxhlet), proteína (método Kjeldhal) y fibra cruda (digestión ácida y alcalina) de acuerdo con lo establecido por la AOAC (2005) y determinación de color en la legumbre.

Capítulo II. Evaluación del efecto de la extrusión sobre las propiedades nutrimentales (porcentaje de extracción proteica e índice glucémico) y actividad fisiológica (fibra dietaria total, soluble e insoluble, polifenoles totales y actividad antioxidante) de harina de lenteja verde y roja.

Capítulo III. Determinación de la calidad tecno-funcional (índice de absorción y solubilidad de agua, formación de masa, microscopia electrónica, determinación de color, dureza, cohesión y adhesión) en harina de lenteja de dos variedades.

Este apartado incluye, además:

Análisis de correlación entre las propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcional de la harina de lenteja verde y roja.

CAPÍTULO I. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la semilla de lenteja verde y roja

1.1 Resumen

La lenteja forma parte de la cultura y tradiciones mexicanas, es de cultivo sostenible y alto valor nutritivo, contiene entre un 23 a 35 % de proteína, aporta calcio, hierro, magnesio, zinc, sodio, potasio, fósforo, selenio, vitaminas B1, B2, B6, C, A, folato, niacina, además de fibra dietaria, carbohidratos digeribles e indigeribles y compuestos bioactivos. Existen diversas variedades de lenteja, generalmente identificadas por su color, en México la variedad verde es la que se produce principalmente, siendo Michoacán el estado productor primordial, la lenteja roja es otra variedad que actualmente es de consumo cotidiano, esta legumbre se ha introducido mayoritariamente por importación. Se realizó la caracterización de las variedades de lenteja (*Lens culinars* M.) verde y roja, la cual consistió en un análisis químico proximal para la determinación de humedad, cenizas, proteína cruda, carbohidratos, fibra dietaria, aceite y azúcares (AOAC, 2005). Con respecto a la variedad verde se evidencia un alto contenido de proteína (27.98 %) siendo superior al presentado en la variedad roja (25.84 %). De igual manera el contenido de fibra dietaria total fue superior en lenteja verde (26.93 %) con respecto a la roja (23.20 %). Los componentes minoritarios en lenteja verde y roja fueron lípidos (1.56 y 1.02 %) y cenizas (2.92 y 2.72 %). El contenido de hidratos de carbono es superior en la lenteja roja (39.92) en comparación a la variedad verde, contrariamente a lo presentado en humedad. Sin embargo, se presenta una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre variedades en cada una de las determinaciones realizadas, evidenciando el gran aporte nutrimental que presenta la lenteja, siendo ligeramente superior en la variedad verde.

Palabras clave: Químico proximal, legumbres, variedades.

1.2 Estado del Arte

Estadísticas de producción y consumo de lenteja

La lenteja tiene sus orígenes en los países del sureste de Asia, norte de África, Europa Occidental y parte de Latinoamérica. Los países con mayor producción son India, Canadá y Turquía; el cultivo de lenteja se ubica en sexto lugar del ranking global de producción de granos secos (Sáenz-Reyes et al., 2022). La lenteja es uno de los alimentos más antiguos cultivados por el hombre. Aunque puede considerarse un grano de escaso consumo, en los últimos años se ha observado un incremento en esta actividad, debido a su alto valor nutricional: proteína, fibra, vitaminas y minerales (SADER, 2023).

En México, la lenteja se siembra en aproximadamente 8550 ha; de acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo, el estado con mayor producción es Michoacán, con 9496 toneladas, que equivalen al 93.9 % nacional seguido de Guanajuato con 612 toneladas y San Luis Potosí con cuatro toneladas (SADER, 2023).

Clasificación taxonómica y descripción botánica de la lenteja

La lenteja (*Lens culinaris* M.) pertenece al grupo de las legumbres (leguminosas grano). En el Cuadro 1 se presenta la clasificación taxonómica de la lenteja (Arqueroz, 2023).

Cuadro 1 Clasificación taxonómica de la lenteja (*Lens culinaris* M.).

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae o Leguminosae
Subfamilia	Faboideae
Tribu	Fabeae
Género	<i>Lens culinaris</i>
Especie	Medik

“

La lenteja (*Lens culinaris* M.) es una planta anual herbácea de la familia *fabaceae*, con tallos de 30 a 40 cm, endebles, ramosos y estriados, hojas oblongas, estípulas lanceoladas, zarcillos poco arrollados, flores blancas con venas moradas, sobre un pedúnculo axilar. Sus semillas son simples, con dos o tres semillas pardas en forma de disco de medio centímetro de diámetro, cabe señalar que el tamaño de la semilla es variable dependiendo de la variedad de que se trate. La estructura de la semilla de la lenteja es similar a la de otras legumbres, sus componentes básicos son tres: envoltura, embrión y cotiledón, con la única diferencia en su envoltura, al ser más delgada (Vicente, 2017). Las semillas de lenteja tienen la ventaja de ser tolerantes a la sequía extrema; sin embargo, son poco tolerantes a los climas fríos (SADER, 2015).

Actualmente, la producción de alimentos demanda atención en la obtención de cultivos sostenibles, ya que su producción tiene un impacto en el medio ambiente. Se estima que el cultivo y procesamiento de alimentos genera mundialmente un 26 % de los gases de efecto invernadero. Es importante mencionar que no todos los alimentos tienen el mismo impacto, por lo que la producción de algunos alimentos es más sostenible que otros, por ejemplo, la producción de vegetales suele tener una huella de carbono baja (JÁE, 2021). En el caso de la lenteja, se considera un alimento de consumo habitual con bajo impacto ambiental (su huella de carbono es de 0,9 kg CO₂/kg) emitiendo bajos niveles de gases con efecto invernadero, en comparación con otros alimentos como el arroz (4 kg CO₂/kg). El cultivo de lenteja no necesita fertilizantes químicos ya que es capaz de captar nitrógeno de la atmósfera y fijarlo al suelo, favoreciendo además el crecimiento de cultivos cercanos. Requiere de poca agua durante su crecimiento, ya que, al contar con raíces largas y profundas, no compite con otros cultivos en la captación de agua y nutrientes, favoreciendo indirectamente a cultivos cercanos (SADER, 2023).

Variedades de lentejas

Existen distintas variedades de lentejas, cada una de ellas tiene características propias, su contenido nutricional puede cambiar según la variedad y se diferencian básicamente por su coloración. La cromaticidad de las lentejas va desde matices rojos-rubios hasta amarillos-verdes. Se identifican numerosas variedades de lenteja producidas (Palacios, 2021):

- Lentejas marrones: son la variedad más común, su tono puede ir del marrón caqui al negro oscuro y tienen un sabor suave y terroso. Son mayormente cultivadas en España, Alemania e India.
- Lentejas verdes: son similares a las marrones, ya que se presentan en varias tonalidades y tamaños, pero tienen un sabor más pronunciado, terroso y ligeramente picante, se cultiva en su mayoría en México y España.
- Lentejas rojas: de notas dulces y sabor a nuez, se diferencian de las verdes y marrones en su menor tiempo de cocción, al ablandarse pierden su forma. Es cultivada en Canadá.
- Las lentejas amarillas o guisantes son parecidas a las lentejas rojas. Son típicas de la cocina india.
- Lenteja negra “beluga” o caviar: recibe su nombre del caviar beluga y son las más pequeñas, normalmente más apreciadas del grupo. Es la variedad con más valor proteico reportado, descritas con un sabor agradable y profundamente terroso, son cultivadas principalmente en Asia.

El estado de Michoacán como principal productor de lenteja en México, cultiva primordialmente la variedad verde (Sáenz-Reyes et al., 2022). Otra variedad que actualmente es distribuida y consumida en México es la roja, esta variedad se ha introducido en el mercado mexicano mayormente por importación (Olmedilla et al., 2010). Es importante mencionar que el aporte nutricional puede variar dependiendo de la variedad de lenteja que se trate, en el caso de la variedad verde y roja son: la lenteja verde está cubierta por una cutícula en comparación a la lenteja roja, la cual al carecer de esta cutícula se encuentra en forma dividida, es por eso que la lenteja verde requiere un mayor tiempo de cocción en comparación a la lenteja roja, otra característica específica de cada una de ellas es que la lenteja verde tiene sabores con notas amargas, mientras que la roja presenta sabores con notas dulces (**Figura 1**).

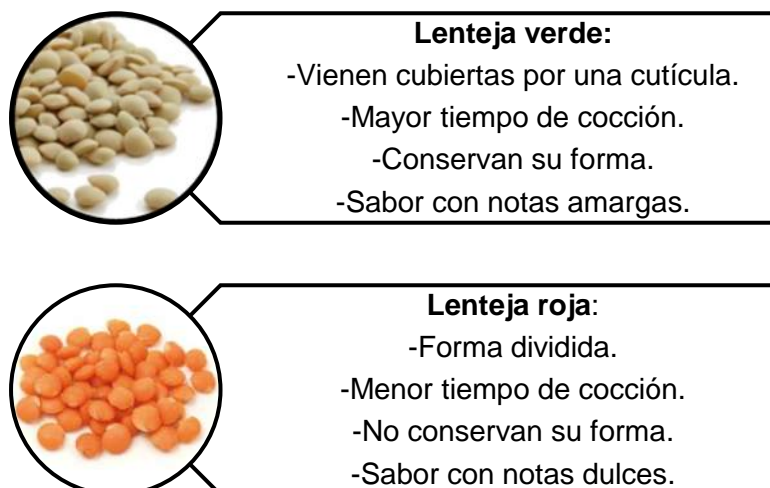


Figura 1 Características de las variedades de lenteja verde y roja (*Lens culinaris* M.).

Composición química y nutrimental de lenteja

Por su aporte nutrimental, los cereales y las legumbres constituyen la base de una dieta saludable. Los cereales destacan por su alto contenido de carbohidratos, grasas monoinsaturadas y grasas poliinsaturadas, vitaminas A, B6, B12, C, hierro, potasio, fósforo y calcio y aminoácidos. Algunos ejemplos de cereales son: arroz, trigo, maíz, avena, sorgo y centeno (Hervert-Hernández, 2022). Por otro lado, las legumbres ayudan a mejorar la calidad del suelo por su capacidad de captar nitrógeno de la atmósfera y fijarlo al suelo favoreciendo a los cultivos cercanos y requieren menos agua en comparación a los cereales. Las legumbres destacan por su contenido de carbohidratos complejos, los cuales al absorberse lentamente ayudan a no incrementar los niveles de glucosa en sangre de manera abrupta, son ricas en proteínas, fibra, vitaminas y minerales como el hierro. Algunos ejemplos de legumbres son: garbanzo, haba, frijol y lenteja, siendo esta última una de las legumbres con mayor aporte nutrimental (Anaya-López et al., 2021)

Las lentejas tienen cualidades nutricionales importantes, aportan de un 15 % a 35 % de proteína. Contiene triptófano; sin embargo, presenta bajo contenido de aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) por lo que se complementan con los cereales ya que son ricos en metionina, cisteína y triptófano, pero limitantes en lisina (Olmedilla et al., 2010). El contenido de proteína de la lenteja se encuentra cercano al reportado para la soya (36.5 %) y es superior al reportado para garbanzo (19.32 %) (Minuzzi et al., 2007). Además, contiene carbohidratos

“ digeribles e indigeribles, lo que permite que, al consumirla, los niveles de glucosa en sangre no aumenten y se tenga una sensación de saciedad durante más tiempo. Presenta un bajo contenido de lípidos (0.7-3.5 %), siendo en general grasas de buena calidad nutricional, ya que se encuentran conformadas por ácidos grasos insaturados, predominando los ácidos grasos oleico, linoleico y linolénico (Herrera et al., 2021).

Así mismo, es rica en fibra dietética, alrededor de 17 gramos por cada 100 gramos, conformada principalmente por polisacáridos complejos, como celulosa, hemicelulosas, pectinas, gomas o mucílagos, acompañados de lignina (Álvarez y González, 2006). Por otro lado, contiene micronutrientes como calcio, hierro, magnesio, zinc, sodio, potasio, fósforo y selenio (Lorzano et al., 2018). Así mismo, posee polifenoles y compuestos fenólicos que actúan como antioxidantes y retrasan el envejecimiento celular, su concentración está directamente relacionada con el color/variedad de la que se trate. Por último, es importante destacar su alto contenido de vitaminas B1, B2, B3, B5, B6, B9, A, C, K y E (Hall et al., 2017). También contiene compuestos anti-nutricionales que pueden limitar la absorción de sus nutrientes. Estos compuestos incluyen inhibidores de tripsina, ácido fítico, taninos y oligosacáridos, que pueden interferir con la digestión y asimilación de proteínas y carbohidratos. Por ejemplo, los inhibidores de proteasas pueden interferir con la absorción de aminoácidos y los inhibidores de amilasa pueden afectar la digestión de carbohidratos complejos (Oblitas, J. 2017). Taninos, los cuales además de su capacidad antioxidante pueden unirse a proteínas y hierro, dificultando su digestión. Además, los oligosacáridos pueden causar distensión abdominal y flatulencias, ya que el cuerpo no puede descomponerlos por completo. Afortunadamente, hay métodos tradicionales como el remojo, la germinación y la cocción por ebullición, que pueden ayudar a reducir o eliminar estos compuestos anti-nutricionales (Cuj et al., 2017).

Una forma de aprovechar los beneficios nutricionales y funcionales de la lenteja es mediante el desarrollo de una harina de lenteja pulverizada con las ventajas mencionadas anteriormente. Esta harina puede ser utilizada como materia prima para la elaboración de otros productos alimenticios o como sustituto de otras harinas, como la de trigo, para mejorar sus características nutricionales. La harina de lenteja puede ser utilizada en diversas industrias, como la panadería, la producción de bebidas fermentadas y la elaboración de pastas, entre otras opciones (Bala et al., 2022).

Parámetros de calidad de la semilla de lenteja

Es importante verificar la calidad de las legumbres, ya que de ello dependerá la aceptación del producto final por parte del consumidor, las características tecno-funcionales y el valor nutricional. Algunos factores que inciden directamente sobre estas propiedades son: tamaño de la semilla, ausencia de semillas partidas y dañadas, rugosidad anormal, color, humedad, sanidad y homogeneidad (Delgado-Andrade et al., 2016). De acuerdo con el (CODEX STAN 171-1989) las semillas deben estar exentas de olores y sabores extraños, sin restos de materia orgánica o mineral (polvo, ramitas, tegumentos, semillas de otras especies, insectos muertos, fragmentos o restos de insectos y otras impurezas de origen animal) permitiendo como máximo 1 % de materia extraña (no más de 0.25 % será de materia mineral y no más de 0.10 % de insectos muertos, fragmentos o restos de insectos y/u otras impurezas de origen animal), así mismo se permite un máximo de 7 % para semillas que no han alcanzado el desarrollo normal, con mancha extensa del tegumento, con el tegumento arrugado, con plegamiento marcado y una máximo de 3 % de legumbres quebradas (Olivares, 2016).

Los índices de calidad citados con anterioridad repercuten directamente con la aceptación de las legumbres, por ejemplo:

Tamaño de la semilla: es uno de los más importantes para la comercialización del producto. Está directamente relacionado con la variedad de la cual se trate y puede ser afectado por factores climáticos, así como plagas.

Color: existen distintas variedades de lenteja, las cuales se caracterizan por su distintivo color, siendo importante la homogeneidad en cada variedad, así mismo se busca que no existan manchas superficiales. Un cambio en la coloración o la presencia de manchas extrañas puede ser generado por un aumento en la humedad durante la fase final de maduración (Ríos-Castillo et al., 2018).

Proporción de la cutícula: el grosor puede afectar la palatabilidad y dificultar la buena cocción. Puede ser afectada por factores climáticos.

Calidad nutricional: incluye en contenido de proteína, sustancias minerales, vitaminas y la presencia de factores anti-nutricionales. El contenido nutricional puede cambiar dependiendo de la variedad de la que se trate, sin embargo, factores climáticos, calidad de suelo, presencia

de plaga y estrés durante el crecimiento de la planta pueden afectar su calidad nutricional (Delgado-Andrade et al., 2016).

Considerando lo antes mencionado, las lentejas pueden representar una alternativa destacable nutricionalmente, así como figurar una opción viable no solamente para su consumo directo con base en las costumbres culinarias de la población, sino ser parte de las matrices alimentarias que a su vez puedan ser tecnológicamente procesadas para la obtención de alimentos funcionales y nutritivos.

1.3 Objetivo

Caracterizar en sus propiedades fisicoquímicas a la semilla de lenteja (*Lens culinaris* M.) variedades verde y roja.

1.4 Materiales y Métodos

Material biológico. Para llevar a cabo la presente investigación se utilizó lenteja (*Lens culinaris* M.) de dos variedades (verde y roja) la variedad roja fue marca Lima Limón® y la variedad verde marca Verde Valle®, ambas fueron adquiridas en un mercado local, fueron trasladadas al laboratorio de Biotecnología “M.C. Víctor M. Rodríguez Alcocer” de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las lentejas se pulverizaron a un tamaño de partícula de 0.25 mm utilizando un molino Goldenwall®. Del pulverizado se tomaron las muestras correspondientes para la caracterización fisicoquímica de la semilla.

Caracterización fisicoquímica de la semilla de lenteja

Determinación de la composición química proximal de la lenteja

Al pulverizado de lenteja de cada variedad se le realizó un análisis químico proximal en base seca utilizando la metodología descrita por (AOAC, 2005). A continuación, se describe la metodología para cada parámetro determinado.

“

Porcentaje de humedad. La humedad se determinó por secado en horno, se colocaron 3 g de la lenteja pulverizada en una cápsula a peso constante, la cápsula con la muestra se llevó a una temperatura de secado de 105 °C/ 4 horas en un horno NOVATECH®. Por último, se colocó la cápsula en un desecador durante 30 minutos y se pesó.

Los cálculos se realizaron usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(P_m - P_s)}{M} (100)$$

Donde:

P_m: peso de la cápsula y la muestra seca en gramos.

P_s: peso de la cápsula en gramos

M: peso de la muestra húmeda en gramos.

Cuantificación de cenizas. Para la determinación de cenizas se colocaron 3 g de la muestra de lenteja pulverizada en un crisol a peso constante, primero se incineró la muestra a 150 °C hasta que la muestra tuvo un color carbón uniforme, posteriormente se incineró en una mufla a 560 °C/ 4 horas. Finalmente, el crisol fue atemperado durante 30 minutos en un deshidratador y se pesó.

Los cálculos se realizaron usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{(P_{cc} - P_{sc})}{M} (100)$$

Donde:

P_{cc}: peso del crisol con ceniza en gramos.

P_{sc}: peso del crisol a peso constante en gramos.

M: peso de la muestra en gramos.

“

Determinación del contenido de aceite. Para el contenido de aceite (extracto etéreo) se utilizaron 3 g de la muestra previamente deshidratada, la muestra se colocó en cartuchos de celulosa y se tapó con un algodón. Se coloraron 150 ml de hexano en un matraz balón a peso constante y se llevó a reflujo durante 5 horas en el extractor Soxhlet a 69 °C. Transcurrido el tiempo se recuperó el hexano por condensación, el matraz balón fue colocado en una estufa a 110 °C/ 4 horas, posteriormente se colocó el matraz en un desecador por 30 minutos y se pesó. Los cálculos se realizaron usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ aceite} = \frac{(PG - Ps)}{M} (100)$$

Donde:

PG: peso en gramos del matraz con grasa.

Ps: peso en gramos del matraz son grasa.

M: peso de la muestra en gramos.

Concentración de proteína. Para la determinación de la concentración de proteínas se utilizó el método Kjeldhal, dicha determinación se dividió en 3 etapas:

1. Digestión o mineralización: colocando 1 g de la muestra, 0.7 g de HgO, 10 g de sulfato de sodio anhidro y 25 ml de ácido sulfúrico concentrado en un matraz kjeldhal, se acopló al equipo y se llevó a digestión a 110 °C/ 40 minutos, posteriormente se atempero por 1 hora hasta la formación de sales cristalinas.

2. Destilación: al matraz kjeldhal se le añadieron 220 ml de agua destilada, 5 perlas de ebullición, 25 ml de tiosulfato de sodio al 8 % y 75 ml de hidróxido de sodio al 45 %, se acopló el matraz al equipo y se destiló la muestra, el destilado se recuperó en matraz Erlenmeyer el cual contenía 50 ml de ácido sulfúrico 0.1N y 4 gotas de indicador rojo de metilo.

3. Valoración: una vez que el matraz Erlenmeyer alcanzó una capacidad de 200 ml se desacopló del equipo y se realizó una valoración con hidróxido de sodio 0.1N.

El porcentaje de proteína se calculó usando la siguiente fórmula y empleando el factor de conversión de 6.25:

$$\% \text{ proteína} = \frac{[(V_{am}N_{am} - V_{bm}N_{bm}) - (V_{ab}N_{ab} - V_{bb}N_{bb})](0.1471\text{meqN})(6.25)]}{M} (100)$$

Donde:

V_{am} : volumen de ácido de la muestra.

V_{bm} : Volumen de la base de la muestra.

N_{am} : Normalidad acida de muestra.

N_{bm} : normalidad básica de la muestra.

V_{ab} : Volumen ácido del blanco.

V_{bb} : volumen base del blanco.

N_{ab} : normalidad de ácido del blanco.

N_{bb} : normalidad base del blanco.

M : muestra en gramos.

Determinación de la fibra dietaria total (FDT). Se siguió el método enzimático gravimétrico, el cual se basa en digerir las proteínas e hidratos de carbono con tres enzimas: alfa amilasa, proteasa y amiloglucosidasa (marca Sigma-Aldrich®). Se colocó 1 g de la muestra, 40 ml de solución tampón MES/TRIS y 50 μL de solución de α -amilasa en un vaso de precipitado cubierto de papel aluminio, se incubó a 95 $^{\circ}\text{C}$ / 30 minutos y se enfrió a 60 $^{\circ}\text{C}$, posteriormente se añadieron 50 μL de solución de proteasa y se incubó a 60 $^{\circ}\text{C}$ /30 minutos para ajustar el pH a un valor de 4.0-4.7, finalmente se añadieron 150 μL de solución de amiloglucosidasa y se incubó a 60 $^{\circ}\text{C}$ /30 minutos. Posteriormente se realizó la precipitación de la fibra dietaria total agregando 220 ml de etanol 95 %/ 60 $^{\circ}\text{C}$ y se dejó reposar por 1 hora, a continuación, se filtró el contenido con papel filtro de poro cerrado. La FDT, se calcula previo descuento del remanente de cenizas y proteína siguiendo los métodos descritos anteriormente.

$$\text{FDT} = \frac{(R_{\text{muestra}} - P_{\text{proteínas}} - P_{\text{cenizas}} - B)}{M} (100)$$

Donde:

R_{muestra} : residuo de la muestra en gramos.

Pproteínas: peso de la proteína en gramos.

Pcenizas: peso de cenizas en gramos.

B: blanco.

M: peso de la muestra en gramos.

Cuantificación de carbohidratos totales. Se determinaron a partir del porcentaje remanente de las determinaciones citadas previamente:

$$\% \text{ Carbohidratos totales} = 100 - \% \text{ Humedad} - \% \text{ Cenizas} - \% \text{ Lípidos} - \% \text{ Proteína} - \% \text{ FDT}$$

Determinación de los parámetros de color de la lenteja.

Determinación del ángulo de matiz e índice de saturación. Se utilizó la metodología por colorimetría utilizando un colorímetro FRU®. Se colocaron las semillas de lenteja enteras en una caja Petri de vidrio y se realizaron las lecturas en tres diferentes puntos de la muestra para obtener los valores de L (Luminosidad) y las coordenadas de color a y b. A partir de los valores de L, a y b se determinaron los atributos de color, ángulo de matiz (AM) e índice de saturación (IS). Los cálculos se llevaron a cabo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Índice de Saturación (IS)} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{Ángulo de Matiz (AM)} = \arctan \frac{b}{a}$$

Diseño y Análisis Estadístico.

Se llevó a cabo un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico JMP11 y comparados mediante un análisis de varianza de una vía, las medias fueron comparadas con una prueba de Tukey con un nivel de significancia $P \leq 0.05$.

1.5 Resultados y discusión

Determinación de la composición química proximal de la lenteja.

El análisis químico proximal permite determinar el contenido de macronutrientes de un alimento, permite además de evidenciar aspectos como el valor nutrimental, el cumplimiento con lo establecido en la normatividad, la calidad del producto y determinar las condiciones para su procesamiento. El análisis químico proximal de la lenteja variedades verde y roja se muestra en la Tabla 1. A continuación, se abordará cada macronutriente analizado.

Porcentaje de humedad. La determinación de humedad en un alimento es un análisis indispensable, ya que permite controlar la proliferación de hongos y microorganismos durante su transporte y almacenamiento, así como conservar la viabilidad de los productos agrícolas para el fin que se le requiera. De acuerdo con la (NOM-247-SSA1-2008) el nivel máximo permitido de humedad en legumbres es de 15 %. La lenteja verde presentó un contenido estadísticamente significativo ($\alpha=0.05$, $R^2= 0.96$) mayor a la lenteja roja (8.49 % y 7.30 % respectivamente), el contenido de humedad obtenido en ambas variedades analizadas se encuentra dentro de los límites sugeridos por el (CODEX STAN 171-1989). De acuerdo con Aguilar-Valenzuela et al., (2011) el contenido de humedad no depende de la variedad de lenteja que se trate, está directamente relacionado con el envasado y almacenamiento que tuvo. En general las legumbres destacan por su bajo contenido de humedad, siendo un alimento no perecedero por excelencia, al contienen entre 1.7 y 14 %. Las legumbres con mayor contenido de humedad son haba y garbanzo (14-10 %), seguido de lenteja (10-7 %) y soya (9-6 %) (Enjamio et al., 2016).

Tabla 1 Análisis químico proximal de la lenteja verde y roja (crudas) en base seca

	Lenteja verde	Lenteja roja
Humedad [%]	8.49 ± 0.28a	7.30 ± 0.16b
Proteína [%]	27.98± 0.06a	25.84 ± 0.14b
Hidratos de carbono [%]	32.46 ± 0.47b	39.92 ± 0.07a
Fibra dietaria total [%]	26.93 ± 0.85a	23.2 ± 0.35b
Aceite [%]	1.56 ± 0.39a	1.02 ± 0.16a
Cenizas [%]	2.92 ± 0.02a	2.72 ± 0.03b

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

Determinación de proteína. Uno de los componentes mayoritarios de la lenteja es la proteína, en la Tabla 1 puede observarse que ambas variedades de lenteja presentan un contenido en proteína diferente significativamente ($\alpha=0.05$) entre ambas variedades, siendo superior en la variedad verde (27.98 %) en comparación a la roja (25.84 %), dicha diferencia está asociada con la variedad de la lenteja. De acuerdo con Cárdenas et al., (2014) la lenteja verde presenta un mayor contenido de proteína que la lenteja roja y que la lenteja beluga es la variedad que presenta el mayor contenido de proteína (30-35 %). Los valores de proteína observados en las variedades de lenteja analizadas se encuentran cercanos al reportado para la soya (36.5 %) por Minuzzi et al., (2007) y es superior al reportado para garbanzo (19.32 %) por Herrera et al., (2021). Estudios realizados por Chicaiza y García (2017) indicaron un contenido de proteína de 24.63 % en lenteja verde, siendo menor al obtenido en este estudio; sin embargo, dichos valores se encuentran dentro del rango en contenido proteico reportado para distintas variedades de lenteja: verde, roja, marrón y negra (20.6 - 31.4 %) (Chelladurai y Erkinbaev, 2020). La variación observada en las concentraciones de proteína reportadas por diversos autores puede deberse a factores como: la zona geográfica de producción, el tipo de suelo y la fertilización, el clima, estrés, estado de maduración en que se encuentre la semilla y el tipo de variedad del que se trate (Delgado-Andrade et al., 2016). Con respecto a los cereales, Melgar (2023) reportó un contenido de proteína en trigo de 9-12 %. Así mismo, Ñahuinlla (2023) reporta un contenido de proteína de entre 8 y 11% en maíz crudo, siendo inferior al presentado en lenteja verde y roja. Sin embargo, es importante mencionar que las legumbres son deficientes en metionina, siendo los cereales ricos en este aminoácido, pero deficientes en lisina y triptófano, aminoácidos esenciales que contienen las legumbres. En este sentido, se

recomienda una combinación de cereales y legumbres durante la alimentación para la obtención de proteínas completas y de calidad (Aguilera, 2009). Por otro lado, la presencia de cascarilla en la lenteja verde podría estar relacionada con la diferencia en su contenido con respecto a la variedad roja, ya que la proteína no se distribuye por igual en las diferentes partes de la lenteja, la mayor concentración de proteína está en los cotiledones con un 90%, seguido del embrión con un 5 % y finalmente la cascarilla con alrededor de un 4 %, siendo la globulina la proteína con mayor presencia en la lenteja (70 %), seguida de las gluteinas (10-20 %) y las albúminas (5-15 %) (Vicente, 2017).

Comparativamente con el contenido de proteína en carne roja (26 %) (Ayala, 2018), la proteína en la legumbre analizada es similar, convirtiéndose en una alternativa para proveer a la población de este nutriente a un menor costo que la proteína de origen animal, sin dejar de lado que la producción de legumbres es un proceso sostenible con un impacto positivo para el medio ambiente en comparación de la producción de fuentes proteicas de origen animal (Quesada y Gómez, 2019). Es importante mencionar que, a diferencia de la proteína de origen animal, la proteína de la lenteja presenta algunas limitaciones, como bajo contenido de aminoácidos azufrados y triptófano, por lo cual es recomendado complementar con las proteínas de los cereales que en su composición contienen dichos aminoácidos (Oblitas, 2017).

Cuantificación de carbohidratos. Los hidratos de carbono en la lenteja verde y roja fueron de 32.46 % y 39.92 % respectivamente, existiendo diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre ambos, dichos valores son comparables a los reportados por otros autores (González, 2000), además es equiparable al de la soya (30.16 %) y menor para haba (58.29 %) (Delgado-Andrade et al., 2016). Con respecto al contenido de hidratos de carbono en cereales, Melgar (2023) reportó un contenido de entre 65-75 % en trigo, siendo superior al obtenido en lenteja. Así mismo, Aparicio et al., (2022) reportaron un contenido de hidratos de carbono superior en maíz (67-73 %), trigo (65-70 %), arroz descascarado (76-78 %) y arroz blanco (79-81 %).

Es importante mencionar que el contenido de hidratos de carbono en las legumbres y en este caso la lenteja verde, está conformado por carbohidratos digeribles e indigeribles, lo que permite que al consumir la lenteja, los niveles de glucosa en sangre no aumenten

abruptamente, manteniéndose un índice glucémico bajo, condición que además proporciona al individuo que la consume una sensación de saciedad durante un tiempo prolongado (SADER, 2023) a diferencia de otros alimentos como el trigo y sus derivados. La diferencia en el contenido de carbohidratos entre la lenteja verde y roja se debe principalmente al tipo de carbohidratos que lo conforman, la lenteja roja presenta un mayor contenido de monosacáridos y disacáridos lo cual puede relacionarse con su sabor a notas dulces, mientras que la lenteja verde presenta un mayor contenido de polisacáridos lo cual se puede relacionar con un mayor contenido de fibra dietaria (Carbajal, 2013).

Fibra dietaria total. La fibra dietaria total (FDT) en la lenteja está conformada principalmente por polisacáridos complejos tales como celulosa, hemicelulosa, pectinas, gomas o mucílagos, acompañados de lignina. La diferencia en el contenido de FDT en lenteja verde y roja (27.69 y 23.2 %) fue significativo ($\alpha=0.05$). esta diferencia entre variedades, se debe principalmente a la presencia de cascarilla en la variedad verde en comparación a la roja que está desprovista de dicha cascarilla, sin embargo, ambas variedades destacan frente a otras legumbres como haba (25 %), garbanzo (12.2 %) y soya (9.3 %) (Delgado-Andrade, et al., 2016). De acuerdo con Carbajal (2013) el contenido medio de DFT en cereales y futas es de 32 y 38 %, siendo ligeramente superior al obtenido en lenteja. Por otro lado, Sterna et al., (2016) reportó un contenido de FDT inferior en avena descascarada y avena con cáscara (17.63 y 22.97 %). Funcionalmente la FDT representa un elemento destacable en el bienestar del organismo humano. Así mismo, mejora sus propiedades tecno-funcionales como la viscosidad, capacidad gelificante, índice de absorción de agua y aceite, mejorando la textura en la matriz alimentaria (Molina y Matín, 2017).

Contenido de aceite. En cuanto al contenido de aceite, no se aprecia una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre los resultados para ambas variedades, siendo de 1.56 % para la variedad verde y de 1.02 % para la roja, en general las legumbres se caracterizan por un bajo contenido de lípidos (0.7-3.5 %); sin embargo, son considerados de buena calidad nutricional, ya que se encuentran conformados por ácidos grasos insaturados, predominando el ácido oleico, linoleico y linolénico. Ambos valores son comparables a los reportados para distintas variedades de lenteja (verde, roja, marrón y negra) siendo de 0.7 a

4.3 % (Chelladurai y Erkinbaev, 2020). En comparación a otras legumbres, (Obregón et al., 2012) obtuvieron valores para garbanzo crudo en base seca por debajo a los reportados en el presente estudio. Comparativamente con la soya cuyo contenido en lípidos es de 15-20 % (Luna Jiménez, 2006), el contenido de lenteja verde y roja es significativamente más bajo. Con respecto a los cereales, López (2023) reportó un mayor contenido de aceite en maíz (4.8 %) conformado principalmente por ácidos grasos oleico, linoleico y palmítico. Así mismo, Vázquez (2013) reportó un contenido superior de aceite en trigo (2.53 %).

Aunque el contenido de lípidos en lenteja es bajo, como se mencionó anteriormente, los ácidos grasos insaturados que contiene son considerados como “grasas buenas” ya que ayudan a disminuir el colesterol LDL, previniendo enfermedades cardiovasculares, reduce la formación de placas en las paredes de las arterias (Aires et al., 2005).

Porcentaje de cenizas. El valor de cenizas es una cuantificación general del contenido de minerales presentes en los alimentos, la lenteja contiene micronutrientes como calcio, hierro, magnesio, zinc, sodio, potasio, fósforo y selenio. En el contenido de cenizas se aprecia una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre ambas variedades, siendo superior en la variedad verde (2.92 %) en comparación a la roja (2.72 %), dichos valores se asemejan al reportado por (Polo, 2012) siendo de 2.83 % y menciona que la lenteja verde suele presentar un mayor porcentaje de cenizas por la cascarilla que contiene a diferencia de la lenteja roja. El contenido de cenizas en lenteja es similar al reportado en garbanzo crudo (2.6 %). La lenteja destaca por tener un mayor contenido de hierro, fósforo y zinc, dichos minerales son importantes en funciones metabólicas, como la función muscular, el estímulo nervioso, actividades enzimática y hormonal y el transporte del oxígeno (Obregón et al., 2012).

Determinación de los parámetros de color de la semilla de lenteja

El color es un parámetro importante en los alimentos al ser un criterio de aceptación. Las diferentes variedades de lentejas se distinguen por su color, entre ellos: amarillo, naranja, rojo, verde, marrón y negro. Así mismo, este parámetro puede cambiar dependiendo del estado de maduración de la legumbre o por efecto de los tratamientos empleados para su consumo

(Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014). Los resultados de la determinación de color en las lentejas de las variedades verde y roja se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Color de la lenteja verde y roja (crudas enteras).

	Lenteja verde	Lenteja roja
Ángulo de Matiz (°)	72.03 ± 0.43a	47.30 ± 0.21b
Índice de Saturación (%)	10.80 ± 0.10b	26.07 ± 0.53a
Luminosidad (%)	57.35 ± 1.3b	63.40 ± 1.36a

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

El AM para la lenteja verde (72.03°) indica una coloración café-verdosa con un IS de 10.80 % referido a una coloración pálida. En referencia a la lenteja roja, esta presentó un AM de 47.30° relacionado con una coloración roja-amarilla y un IS mayor (26.07 %), lo cual indica una mayor intensidad en su coloración en comparación a la lenteja verde. Los resultados fueron estadísticamente significativos ($\alpha=0.05$). Las diferencias encontradas en los atributos de color son debidas a las características de cada una de las lentejas analizadas (roja y verde). La luminosidad entre ambas variedades indica que la lenteja roja presenta una tonalidad más clara (63.40 %) que la lenteja verde (57.35 %). La coloración en la lenteja verde se relaciona con su contenido de luteína y clorofila, mientras que la lenteja roja por el contenido de carotenoides y antocianina. En general estos pigmentos naturales pueden conferir tonalidades amarilla, verde, naranja o roja dependiendo su concentración y la variedad de lenteja que se trate (Vicente, 2017). Así mismo, el AM obtenido es semejante al reportando en la literatura, indicando un AM mayor en lenteja verde, entre 90.10°-96.70°, y para lenteja roja entre 71.23°-80.37° (Zhang et al., 2014).

1.6 Conclusión

A partir de la caracterización en sus propiedades fisicoquímicas de las variedades de semilla de lenteja (*Lens culinaris* M.) verde y roja, se concluye que la lenteja verde exhibe un mayor porcentaje en los macronutrientes analizados, a excepción de los carbohidratos que son predominantes en la lenteja roja. Destaca la presencia de proteínas en ambas variedades, posicionando a esta legumbre como una opción nutricionalmente relevante como alternativa a las fuentes de proteína animal. Estos componentes nutricionales no solo son fundamentales para mantener la salud humana, sino que también confiere a la lenteja la capacidad de formar matrices alimentarias.

1.7 Referencias Bibliográficas

- Aguilar-Valenzuela, J., Esparza-Rivera, J., Meza-Velázquez, J., Candelas-Cadillo, M., Ahuilera-Ortiz, M., & Ramírez-Vaca, P. (2011). EFECTO DE LA HARINA DE LENTEJA (*Lens culinaris*) sobre las propiedades reológicas y de panificación de la harina de trigo. *Ciencia UAQ*, 4-10.
- Ahmed, ., El-Bassiony, ., Elmalt, ., & Ibrahim, . (2015). Identification of potent antioxidant bioactive peptides from goat milk proteins. *Food Research International*, 80-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.032>
- Aires, D., Capdevila, N., & Segundo, M. (2005). Ácidos grasos esenciales. *ELSEVIER* Vol. 24. Núm. 4, 96-102.
- Anaya-López, J. L., Ibarra-Pérez, F. J., Ortega-Murrieta, P. F., Chiquito-Almanza, E., & Acosta-Gallegos, J. A. (2021). Leguminosas de grano en México: variedades mejoradas de frijol y garbanzo desarrolladas por el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 63-75.
- AOAC. (2005). Official methods of analysis of AOAC International. Obtenido de [http://www.aoac.org/aoac_prod_imis/AOAC/Publications/Official Methods of Analysis /AOAC Member/Pubs/OMA/AOAC Official Methods of Analysis.aspx?hkey=5142c478-ab50-4856-8939-a7a491756f48](http://www.aoac.org/aoac_prod_imis/AOAC/Publications/Official%20Methods%20of%20Analysis/AOAC%20Member/Pubs/OMA/AOAC%20Official%20Methods%20of%20Analysis.aspx?hkey=5142c478-ab50-4856-8939-a7a491756f48).
- Arqueroz, S. (15 de Marzo de 2023). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de Desarrollo de un snak extrusionado de harina de lenteja y maíz dirigido a la población con intolerancia al

gluten: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42513/TFG-M-N2044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Bala, S., Kinabo, J., & Uebersa, M. (2022). *Legume Science* . doi:DOI: 10.1002/leg3.156
- Blanco, B. (2017). *Repositorio insitucional de la Universidad de Burgos*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10259/4515>
- Chelladurai, V., & Erkinbaev, C. (2020). *Pulses: Processing and Product Development*. pringer Nature Switzerland AG.
- Delgado-Andrade, C., Olías, R., Jiménez-López, J., & Clemente, A. (6 de Mayo de 2016). Aspectos de las legumbres nutricionales y beneficiosos para la salud humana. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2016.779n3003>
- García, M., & Serrano, H. (2020). *TecnoAgro*. Obtenido de <https://tecnoagro.com.mx/no-145/leguminosas-de-grano-garbanzos-lentejas-frijol-alubias-habas-y-chicharos-cultivadas-en-mexico>.
- González, A. (2000). Efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble en algunas leguminosas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* Vol. 50(3), 281-285.
- Hall, C., Hilén, C., & Garden-Robinson, J. (2017). Composition, Nutritional Value, and Health Benefits of Pulses. *Cereal Chemistry*, 11-31.
- Herrera, T., Moreno, M., Licea, E., Arratia, A., & Medina, A. (2021). Análisis bromatológicos y funcionales de tres variedades comerciales de. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* Vol 4(4), 5647-5655.
- IMSS. (16 de junio de 2015). *IMSS*. Obtenido de <https://imss.gob.mx/salud-en-linea/nutricion>
- JÁE. (22 de julio de 2021). Legumbres, cultivo sostenible. Obtenido de <https://legumbresjae.com/legumbres-jae-cultivo-sostenible/#:~:text=En%20particular%2C%20las%20lentejas%20son,4%20kg%20CO2%2Fkg.&text=Las%20legumbres%20permiten%20un%20cultivo%20sostenible>.
- López-Espíndola, M., Herrera-Corredor, J., Balderas-López, J., Argumedo-Macías, A., Hernández-Cázares, A., & Muñoz-Marquez, R. (Febrero de 2020). *Agro Productividad*, 13(2), 9-13. doi:<https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1489>
- Luna Jiménez, A. (2006). Valor Nutritivo de la Proteína de Soya. *Rev Investigación y Ciencia*, 29-34.

- Minuzzi, A., Mora, F., Sedrez-Rangel, M. A., De Lucca-Braccini, A., & Scapin, C. A. (2007). Características Fisiológicas, Contenido de Aceite y Proteína en Genotipos de Soya, Evaluadas en Diferentes Sitios y Épocas de Cosecha, Brasil. *Agricultura Técnica (Chile)*, 353-361.
- NOM-247-SSA1-2008. (s.f.). SEGOB. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0
- Oblitas, C. (2017). Tecnologías emergentes en la preservación de alimentos. *Caxamarca* 16(2), 151-161.
- Obregón, J., Bell, C., Estrada, A., Portillo J.J., & F.G. Ríos, F. (2012). Efecto de la cocción de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) de descarte en la respuesta productiva y rendimiento en canal de la codorniz japonesa en engorde (*Coturnix coturnix japonica*). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* Vol 46(2), 169-173. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193024447009>
- Olmedilla, B., Farré, R., Asensio, C., & Martín, M. (2010). Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *Revista Actividad Dietética*, 72-76.
- Polo, I. (2012). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/7111/4.7.001037.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- SADER. (10 de febrero de 2023). Legumbres, uno de los pilares alimenticios que ofrece el campo mexicano. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/legumbres-uno-de-los-pilares-alimenticios-que-ofrece-el-campo-mexicano>
- Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J., Ruíz-Rivas, M., Rueda-Sánchez, A., Castillo-Quiróz, D., & Castillo-Reyes, F. (2022). Diagnóstico del cultivo de lenteja en unidades de producción familiar en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 35-44.
- Sánchez, V. (2014). *Respositorio del Instituto Politécnico Nacional CICATA-QRO*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/13043>
- Sánchez-García, J. (5 de Diciembre de 2023). *Repositorio Institucional Universitat Politècnica de València*. doi:<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/202014>
- SIAP. (07 de Octubre de 2020). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Datos abiertos. Estadística de Producción Agrícola*. Obtenido de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

“

Vicente, L. (23 de Septiembre de 2017). Evaluación de la capacidad antioxidante y su relación con la composición fenólica en lentejas. Obtenido de https://gredos.usal.es/bitstream/10366/137920/1/TG_VICENTE%20PASUCAL,%20La%20ura_%20Evaluación%20de%20la%20capacidad%20antioxidante.pdf

CAPÍTULO II. Determinación del efecto de la extrusión sobre las propiedades nutrimentales y de actividad fisiológica en la harina de lenteja verde y roja

2.1 Resumen

La extrusión de la lenteja es una alternativa para la obtención de harina, es un proceso mecánico que permite mejorar su composición nutrimental, aumentar su digestibilidad y promover cambios en sus propiedades tecno-funcionales. Además, posibilita la obtención de productos con diferentes texturas, formas, sabores y tamaños. Se realizó la determinación de las propiedades nutricionales (porcentaje de extracción de proteína, carga e índice glucémico), propiedades con actividad fisiológica (fibra dietaria total, soluble e insoluble, polifenoles totales y actividad antioxidante) y tecno-funcionales (dureza, cohesión, adhesión, microscopia electrónica de barrido, índice de absorción solubilidad de agua) en harina de lenteja extruida a 90 y 130 °C y sus controles (cruda y cocida). De manera general, la harina de lenteja cruda verde y roja presentó el mayor contenido de polifenoles totales (83.52 y 56.69 mg AG/100g), capacidad antioxidante ABTS⁺ (75.70 y 58.80 % de inhibición) y DPPH^{*} (78.33 y 54.69 % de inhibición), así como extracción de proteína (19.19 y 17.21 %) en comparación a la harina de lenteja verde y roja cocida por ebullición y extruida a 90 y 130 °C. En cuanto al contenido de FDT, FDS y FDI, la harina de lenteja verde presentó un mayor contenido (26.9, 3.10 y 23.80 %) en comparación a la variedad roja (23.21, 2.28 y 20.92 %), aunque posterior al proceso de cocción por ebullición aumento en la variedad verde (38.68, 7.36 31.32 %) y roja (31.59, 6.65 y 24.93 %), sin embargo, el proceso de extrusión presentó un mayor incremento en ambas fracciones, siendo superior a 130 °C en comparación a 90 °C. Los valores de ÍG y CG en harina de lenteja cruda roja fueron superiores (22.18 y 5.54) en comparación a la variedad verde (21.94 y 5.48), presentando un incremento en ambas variedades posterior a la cocción por ebullición. De forma similar la harina de lenteja roja extruida a 90 °C presentó un mayor ÍG y CG (31.39 y 7.84) en comparación a la variedad verde (30.50 y 7.62), dicho comportamiento fue similar durante la extrusión a 130 °C. Sin embargo, la diferencia presentada entre ambas variedades al emplear un mismo tratamiento no presentó diferencia estadística significativa.

Palabras clave: Extrusión, legumbre, índice glucémico y proteínas, actividad antioxidante.

2.2 Estado del Arte

En México, las lentejas se suelen cocinar y consumir como guarnición o sopa. La cocción no solo mejora el sabor de la semilla, también mejora la biodisponibilidad y el valor nutricional de los componentes. La adquisición e ingesta de las lentejas ha disminuido en México, su principal y mayor consumo es en ocasiones tradicionales como la cuaresma y el año nuevo como símbolo de abundancia, fertilidad y riqueza. Posiblemente la disminución en su ingesta se deba a la falta de variantes en la preparación o procesamiento de las lentejas de acuerdo con el estilo de vida actual, lo que limita su consumo y aprovechamiento (Anuradha et al., 2017), por lo que es importante buscar alternativas que permitan diversificar la manera en que se utiliza y consume. Como alternativa destaca el desarrollo de nuevos productos alimentarios que sean fáciles y rápidos de preparar, mayormente digeribles, nutritivos y atractivos para el consumidor o bien matrices alimentarias que puedan ser utilizadas para la elaboración de otros alimentos. Así, es significativo aprovechar las propiedades de la lenteja, fomentando la soberanía, sostenibilidad y seguridad alimentaria (JÁE, 2021). En este sentido, recientemente las harinas de las legumbres han cobrado importancia ya sea para elaborar alimentos directamente o como sustitutos de otras harinas como la de trigo (González, 2000).

Por lo anteriormente mencionado, es importante tener en consideración aspectos relevantes en toda matriz alimentaria, como las propiedades con actividad fisiológica, nutricionales y anti-nutricionales. El valor nutricional de un alimento hace referencia al aporte de proteínas, grasas, azúcares, hidratos de carbono y los compuestos que puedan ser utilizados por el organismo, contribuyen al aporte necesario de una dieta saludable y equilibrada, mientras que los componentes anti-nutricionales limitan su absorción (Carballo, 2011). Por otro lado, las propiedades con actividad fisiológica son aquellos que, tras su ingesta, aportan un efecto benéfico para la salud (IMSS, 2015). A partir de estas propiedades se pueden caracterizar las matrices alimentarias para la elaboración de alimentos de calidad nutricional.

Así, con base en la composición de las legumbres, en las lentejas, se identifican componentes que a nivel del organismo humano y su salud se clasifican en dos grupos: 1. Compuestos con aporte nutrimental y 2. Compuestos que no aportan nutricionalmente, pero proporcionan una

actividad fisiológica importante. Ambos grupos en conjunto repercuten en la salud del organismo humano (Delgado-Andrade et al., 2016).

Compuestos con aporte nutrimental en harina de lenteja

Contenido de proteínas en harinas de lenteja

Las legumbres son apreciadas por sus cualidades nutricionales, diversos estudios indican que las lentejas tienen un alto porcentaje de proteína, oscila entre el 23 y 35 %, siendo superior al presentado en los cereales (3-7 %) y similar o superior al de la carne (18-25), sin embargo, estas últimas son de distinto valor biológico debido a su perfil de aminoácidos (Delgado-Andrade et al., 2016). Las proteínas de las legumbres son consideradas de buena calidad. Sin embargo, son limitadas en aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) y ricos en lisina, por lo que se complementan con los cereales, los cuales son ricos metionina y cisteína, pero pobres en lisina (Arqueroz, 2023). Las proteínas de las legumbres son el nutriente de mayor interés, están constituidas por 70 % de globulinas, 10-20 % albúmina, 10-15 % glutelina y el resto de prolamina. Contrariamente a los cereales, en los que abundan prolaminas y glutelinas como la glutenina, proteína presente en el trigo que junto con la gliadina forman el gluten (Flores et al., 2016).

El gluten es una proteína compleja presente en los cereales como, trigo, cebada, centeno y Avena. Sin, embargo, los seres humanos no poseen la enzima necesaria para su digestión total, logrando hidrolizarse hasta prolaminas, las cuales conservan características ontogenéticas. De esta manera, la intolerancia al gluten es una afección autoinmune debido al consumo de la proteína del trigo (gluten) y prolaminas en personas con genes susceptibles (Arqueroz, 2023).

Por otro lado, el contenido de proteína en lenteja está directamente relacionado con la variedad de la cual se trate. En cuanto a la lenteja verde y roja, existe una ligera diferencia en el contenido de proteína debido a la presencia de cascarilla en la variedad verde ya que, la proteína no se distribuye por igual en las diferentes partes de la lenteja, la mayor concentración de proteína está en los cotiledones con un 90 %, seguido del embrión con un 5 % y finalmente la cascarilla con alrededor de un 4 % (Vicente, 2017).

Composición en carbohidratos

Otro parámetro nutricional importante son los carbohidratos, ya que son la principal fuente de energía para las células, tejidos y órganos del cuerpo. Los carbohidratos son biomoléculas constituidas por C, H y O. Se pueden clasificar en:

Monosacáridos: glucosa, fructosa y galactosa. Son carbohidratos que ya no pueden hidrolizarse

Oligosacáridos: unión de 2 a 10 monosacáridos como rafinosa, verbascosa, maltodextrinas y estaquiosa. No presenta sabor dulce a diferencia de los monosacáridos y disacáridos.

Polisacáridos: unión de 11 o más monosacáridos como almidón, glicógeno y celulosa. Se absorben de forma lenta y se comportan como energía de reserva (Mollinedo y Benavides, 2014).

Las legumbres, con excepción de la soja, se caracterizan por presentar un contenido elevado de carbohidratos digeribles e indigeribles, siendo el almidón el polisacárido mayoritario.

En las legumbres, el almidón está constituido por amilosa y amilopectina. Contrariamente a los cereales, las legumbres se caracterizan por un alto contenido de amilosa, responsables de su baja digestibilidad, permitiendo que, al ser consumidas los niveles de glucosa en sangre no aumenten y se obtenga una sensación de saciedad durante más tiempo (Urbina-Dicao et al., 2023). El impacto que tienen los alimentos sobre los niveles de glucosa en sangre se define como el índice glucémico (ÍG). Por otro lado, la carga glucémica (CG) indica el efecto que tiene un alimento sobre los niveles de glucosa en sangre teniendo en cuenta su ÍG y la cantidad de carbohidratos asimilables en una determinada ración (Olivares, 2016).

Los alimentos con ÍG y CG elevada son ricos en carbohidratos de absorción rápida como azúcares, cereales y harinas refinadas. Sin embargo, existen otros factores los cuales pueden influir en los niveles de ÍG y CG como:

Contenido de fibra: controla la digestión del alimento al disminuir su absorción por lo que, a mayor contenido de fibra, menor ÍG y CG.

Cocción: durante este proceso se genera la hidrólisis de los carbohidratos a azúcares simples (glucosa) por lo que aumenta el ÍG y CG.

Temperatura: denominado retrogradación a la reformación de los gránulos de almidón producido por la cocción (gelatinización) y posterior enfriamiento, generando almidón de digestión lenta.

Procesamiento: el refinado en los cereales como arroz, trigo y sus derivados, disminuye el contenido de fibra aumentando el ÍG y CG (Vega et al., 2023)

Compuestos en la lenteja con propiedades de actividad fisiológica

Fibra dietaria total, soluble e insoluble

Entre los compuestos con actividad fisiológica en las legumbres destacan la fibra dietaria total (FDT) conformada por la suma de su fracción soluble e insoluble. Se define como una sustancia de origen vegetal, que no puede ser digerida por las enzimas del tracto digestivo humano, se compone de polisacáridos estructurales vegetales como celulosa, hemicelulosa, betacarotenos, pectina, mucílago, gomas y lignina, siendo la estructura particular de cada uno de ellos la que determina las propiedades fisiológicas (Álvarez y González, 2006). La fracción insoluble (celulosa, hemicelulosas, lignina) promueve la digestión y aumenta el volumen del bolo fecal, por lo cual se recomienda su consumo en personas que padecen de estreñimiento y para mantener un adecuado funcionamiento intestinal. En tanto que la fracción soluble (pectinas, gomas, mucílago y algunas hemicelulosas) se disuelve en agua y es capaz de formar un material gelatinoso, ayuda a reducir los niveles de glucosa y colesterol en sangre, participando en la prevención y manejo de la diabetes y enfermedades cardiovasculares, se puede encontrar mayormente en avena, guisantes, frijol, manzana, zanahorias y cítricos (Cabrera y Cárdenas, 2006).

Naturalmente, la fibra se encuentra exclusivamente en alimentos de origen vegetal, tales como frutas, verduras, cereales, legumbres y frutos secos, en su mayoría contiene una mezcla de las dos fracciones, soluble e insoluble, aunque predomina la insoluble. En referencia al contenido de fibra dietaria total en las legumbres, la lenteja contiene alrededor de un 25-45 % dependiendo de la variedad, siendo la lenteja Beluga la variedad con mayor contenido de fibra dietaria (45-35 %) por su alto contenido de carbohidratos complejos, así mismo la lenteja marrón presenta alrededor de 35 % de fibra dietaria, la lenteja verde con un 30-35 % y la lenteja

roja con 25-30 % al carecer de cutícula (Delgado-Andrade et al., 2016). La lenteja destaca frente a otras legumbres como haba (20 %), garbanzo (15 %) y soya (10 %), además de los cereales, verduras y hortalizas (25 %) (Delgado-Andrade et al., 2016).

Concentración de Polifenoles Totales y Actividad Antioxidante en la lenteja.

Polifenoles Totales.

Los polifenoles son biomoléculas involucradas en los mecanismos de defensa de las plantas frente a amenazas de microorganismos y predadores. En humanos estos compuestos son importantes a nivel de función fisiológica como vasodilatadores, son capaces de mejorar el perfil lipídico y atenúan la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL) y en general ayudan a retrasar el envejecimiento celular, presentan efectos antiinflamatorios. Algunos polifenoles presentes en la lenteja son los derivados del ácido hidroxibenzoico e hidroxicinámico, flavonoides como flavonoles, flavonas, flavanonas, antocianidinas e isoflavonas, y oligómeros como las proantocianidinas (Lorzano et al., 2018).

Es importante mencionar que existen diferentes factores que influyen en el contenido de polifenoles totales en los productos agrícolas, entre ellos: climáticos, de cultivo, zona geográfica o estrés en la planta. En la lenteja, su contenido puede cambiar dependiendo del tipo de variedad que se trate. En un estudio realizado por Vicente (2017) en distintas variedades de lenteja, reportó un mayor contenido de polifenoles totales en lenteja verde (30.55 mgGAE/100g), la cual posterior a un descascarillado disminuyó un 53 % (16.49 mgGAE/100g). Así mismo reportó el contenido de polifenoles totales en lenteja Beluga, marron y roja (17.81, 23.99 y 16.59 mgGAE/100g). El contenido de polifenoles totales en lenteja es superior en comparación al presente en otras legumbres como garbanzo (2-5 mg AG/100g), soya y frijol (4-10 mg AG/100g) así como trigo (1.66-2.01 mg AG/100g) (Silva, 2023).

Actividad Antioxidante.

La actividad antioxidante de los alimentos está dada por una amplia variedad de compuestos tales como polifenoles, vitamina C y E, carotenoides, terpenoides y minerales traza (Peñarrieta, Tejeda et al., 2014). De manera general, los antioxidantes con mayor presencia en los alimentos son los polifenoles, seguido de las vitaminas y los carotenoides. La ingesta diaria

estimada de polifenoles es de 1g, vitaminas antioxidantes 110 mg y 9.4 mg para los carotenoides (Omah et al., 2010). Los polifenoles relacionados con la actividad antioxidante, son sustancias que impiden o retrasan la oxidación de moléculas, proceso químico que implica la transferencia de electrones de una molécula a un agente oxidante. Las reacciones de oxidación producen radicales libres, estos son altamente reactivos, los antioxidantes tienen la capacidad de inhibir las reacciones de oxidación eliminando a los radicales libres (Fuertes, 2022). Los compuestos antioxidantes con mayor presencia en la lenteja son catequinas y proantocianidinas (78 %), seguido de flavonoles (17 %), flavonas y flavanonas (5 %), y ácido hidroxibenzoico e hidroxicinámico (5 y 3.5 %) el cual se concentra mayormente en la cutícula (Vicente, 2017).

Finalmente, otro grupo de moléculas importante como antioxidante, además de su aporte nutricional y energético son las proteínas. Investigaciones señalan que los péptidos pueden estar presentes como una secuencia independiente o en estado latente en una proteína, la cual puede ser liberada por proteólisis mediante digestión enzimática, fermentación o autólisis, y de esta forma ejercer su actividad fisiológica como antioxidante, antihipertensiva, hipocolesterolémica, antitrombótica, inmunomoduladora, anticarcinogénica e incluso capacidad antiobesogénica (Ahmed et al., 2015). En general las proteínas con actividad antioxidante actúan en función del perfil de aminoácidos que las conforma, por ejemplo: aminoácidos aromáticos como tirosina, histidina, triptófano y fenilalanina estabilizan radicales libres al donar un electrón, manteniendo su propia estabilidad por resonancia; aminoácidos hidrofóbicos como alanina, valina, leucina, isoleucina, metionina, prolina y ácido glutámico incrementan la solubilidad de los péptidos en lípidos; aminoácidos básicos y ácidos presentan función quelante de los iones metálicos por su capacidad para disociarse y donar protones.

Factores anti-nutricionales en las lentejas.

Al abordar aspectos de tipo nutricional en las legumbres, es importante también abordar los compuestos considerados anti-nutricios. Estos compuestos pueden limitar la absorción de los nutrientes, en la lenteja se encuentran los inhibidores de tripsina, ácido fítico, taninos y oligosacáridos (rafinosa, estaquiosa y verbascosa), pueden interferir en la digestión y asimilación de proteínas y carbohidratos (Bala et al., 2022). Por ejemplo, los inhibidores de

proteasas pueden obstaculizar la absorción de aminoácidos y los inhibidores de amilasa pueden afectar la digestión de carbohidratos complejos. Los taninos, por su parte, pueden unirse a proteínas y hierro, dificultando su digestión. Además, los oligosacáridos son causa de distensión abdominal y flatulencias, ya que el cuerpo no puede descomponerlos por completo (Santos y Martínez, 2023). El contenido de factores anti-nutricionales en lenteja puede variar dependiendo de la variedad de la cual se trate o el tratamiento empleado para su procesamiento. El contenido en general de factores anti-nutricionales en lenteja es: fitatos 0.4-1.5 %, lectinas 0.3-0.7 %, saponinas 0.2-0.5 % e inhibidores de proteasa y amilasa 0.2-0.6 % (Martínez, 2016).

En cuanto a las legumbres, la soya presenta niveles elevados de fitatos, lectinas y saponinas en comparación a haba y lenteja. El frijol y haba se caracterizan por contener mayormente fitatos y lectinas, mientras que la lenteja presenta niveles moderados de factores anti-nutricionales, incluyendo fitatos y lectinas, aunque en comparación con otras legumbres, su contenido suele ser más bajo (Vidal et al., 2021). Comparativamente con los cereales, como el trigo, avena, centeno y cebada, las lentejas suelen tener un menor contenido de factores anti-nutricionales, siendo el gluten uno de los más destacados en cereales como el trigo, el centeno y la cebada. Además de fitatos, inhibidores de proteasas y taninos, estos últimos pueden interferir con la absorción de minerales y causar malestar gastrointestinal en grandes cantidades. Cereales como el trigo, cebada y centeno, presentan un mayor contenido de taninos en comparación con las lentejas (Blasco, 2022). Actualmente existen métodos tradicionales como el remojo, la germinación y la cocción por ebullición, que pueden ayudar a reducir o eliminar estos compuestos anti-nutricionales (Oblitas, 2017).

Procesamiento de la lenteja para la obtención de matrices alimentarias.

Como se mencionó con anterioridad, en la actualidad la alimentación es un tema de mayor interés, ya que la población demanda más información con respecto a lo que consume, lo que su organismo necesita y qué alimentos son mejores. Por lo cual se busca diversificar los alimentos con el fin de proveer a la población alimentos más nutritivos, atractivos y accesibles. En este sentido, se ha destacado a la lenteja al tener propiedades nutricionales importantes, así como el contener compuestos con actividad antioxidante relevante. La forma tradicional de

“
consumir las lentejas es procesarlas a través de una cocción hidrotérmica pudiendo antecederla un remojo o imbibición. Sin embargo, existen tecnologías diversas que permiten la transformación de la lenteja, otras legumbres y cereales a matrices alimentarias para su uso como harinas, entre algunos otros productos. Estos pulverizados se obtienen directamente de la molienda de las legumbres y en algunos casos, las semillas son embebidas o se llevan a cocción antes de la molienda con la finalidad principal de disminuir la cantidad de compuestos anti-nutricionales, finalmente se deshidratan y se muelen obteniéndose un pulverizado (Torres-González et al., 2014).

Estos tratamientos de acondicionamiento y térmicos, no solo tienen como objetivo reducir los microorganismos presentes de manera natural, también ofrecen una diversificación de estos, ya que mejoran las cualidades sensoriales mediante la formación de nuevos aromas, sabores, colores y texturas. Aunado a esto también pueden presentarse efectos negativos, como el deterioro del valor nutritivo del alimento por la modificación en la cantidad/calidad de sus nutrientes. El remojo y lavado en los alimentos suelen afectar el contenido de las vitaminas hidrosolubles (vitamina C y B) por lixiviación. Los procesos mecánicos como molienda, triturado o licuado, pueden afectar el contenido de vitaminas y antioxidantes, efecto producido por la acción del oxígeno mediante el aumento de la superficie de contacto. Por otro lado, diversos estudios indican que la aplicación de temperatura controlada a una matriz alimentaria mejora la digestibilidad de las proteínas, favorece el contenido de fibra y promueve la gelatinización del almidón, ayudando así a mejorar sus propiedades tecno-funcionales (Valls, 2003).

La extrusión es una tecnología emergente que permite procesar y producir una gran cantidad de alimentos de diferentes formas, textura y sabor. Permite la obtención de alimentos con mejoras nutricionales y funcionales en comparación con otros métodos tradicionales, al evitar la degradación de los componentes, conservando así los nutrientes y sabores del alimento (Oblitas, 2017). La extrusión consiste en la aplicación de calor y presión durante un corto periodo de tiempo utilizando una máquina llamada "extrusor" o tornillo sinfín. El material para procesar se coloca en un tubo, donde se regula la temperatura mediante resistencias eléctricas. El tornillo helicoidal transporta el material que se deforma por la fricción. Al final, el material deformado sale por una boquilla o dado, que le da la forma deseada (Sánchez, 2014). Permite la inactivación de enzimas, microorganismos y sustancias indeseables que sean poco

resistentes al calor, lo que beneficia el alimento. Estas sustancias pueden propiciar el deterioro de los alimentos, hacerlos menos estables en el almacenamiento o reducir su valor nutricional. Además, la extrusión también ayuda a eliminar compuestos anti-nutricios presentes en la lenteja, como inhibidores de proteasas y amilasa, oligosacáridos y taninos (Oblitas, 2017).

Efecto de la extrusión en los alimentos

La extrusión es un procesamiento de alimentos que implica someter la matriz alimentaria a altas temperaturas y presiones, generando alimentos con diversas texturas, formas, sabores y tamaños. Así mismo, es posible generar cambios en su calidad nutricional, por ejemplo:

Almidón: hidrato de carbono presente en cereales, legumbres, tubérculos y entre otras semillas, se encuentra en forma de gránulos pequeños de diferentes formas (esféricos, ovalados, lentejas o irregulares). Los gránulos de almidón están conformados por la mezcla de dos polisacáridos, los cuales en presencia de agua se fragmentan en amilosa (fracción soluble) y amilopectina (fracción insoluble). Ambas fracciones presentan la misma cantidad de glucosa, pero difieren en su estructura molecular, la amilosa tiene una conformación lineal, mientras que la amilopectina presenta una conformación no lineal. Durante el proceso de extrusión, el gránulo de almidón capta el agua presente, la cual pasa a forma de vapor debido a la presión y temperatura presentes en el interior del extrusor, provocando que el almidón sufra un proceso de lineamiento, rizado y rotura (Mendoza, 2023).

Grasas: debido a la presión que son sometidas en el interior del extrusor, las grasas sufren un proceso de emulsión, generando un encapsulamiento por almidones y proteínas. La emulsificación de las grasas también favorece su digestión, por lo tanto, aumenta la energía que provee el producto final.

Proteínas: una de las ventajas de la extrusión es la inactivación de inhibidores proteicos presentes de manera natural en el producto inicial. Durante la extrusión, y por efecto de la temperatura, se produce un desenrollamiento de las cadenas proteicas, elevando así su digestibilidad. Por otro lado, también se genera la formación de un complejo almidón-proteína, en el cual las moléculas de almidón encapsulan a las proteínas y las protegen de un posible daño generado por la temperatura presente (Contreras, 2017).

“
Fibra: debido al cizalleo presente en el interior del extrusor, es posible generar un desgaste en las paredes de la fibra, por lo tanto, puede incrementarse el contenido de fibra, así como un aumento en su solubilidad.

Vitaminas: en general las vitaminas liposolubles resultan ser estables durante la extrusión, mientras que un contenido adecuado de humedad genera un efecto de retención en las vitaminas A, D y E. Por otro lado, las vitaminas hidrosolubles (C y B) pueden perder estabilidad durante el proceso.

Minerales: son los compuestos que menos se ven afectados durante el proceso de extrusión (Ruiz-Armenta et al., 2018).

Algunos antecedentes de extrusión en cereales y legumbres, como la lenteja, se enlistan a continuación:

- Arqueros (2019) analizó el proceso de extrusión en masa de lenteja y maíz (1:1), determinó que, se puede obtener un bajo contenido de grasas, buen contenido de proteínas y carbohidratos, bajo porcentaje de humedad y gelatinización del almidón.
- Stone y colaboradores (2017) analizaron la influencia de los parámetros de extrusión en las propiedades físicas de extruidos de garbanzo y cebada, en ambos casos con el proceso de extrusión se logró obtener una mejor consistencia, así como mejores características de compresión y corte.
- Yuan-Yuan (2013) analizó la influencia de las condiciones de extrusión y la adición de cáñamo en propiedades de pan y masa de trigo, reportando que la harina extruida presentó mejor viscosidad y aumento de la absorción de agua. Por otro lado, el proceso de extrusión modificó los parámetros de color en pan y masa.
- Seth y colaboradores (2013) analizaron el efecto de la composición del alimento, el contenido de humedad y la temperatura de extrusión en las características de extrusión de bocadillos a base de ñame, maíz y arroz. La extrusión aumentó la absorción de agua en la masa y la viscosidad. Así mismo, el producto presentó niveles más bajos de humedad y mejor textura en general.

Además de los efectos mencionados en los párrafos anteriores por el proceso de extrusión, la extrusión ofrece la ventaja de producir alimentos con diversas texturas, formas, sabores y

tamaños, lo cual puede ser una forma de aprovechar los beneficios nutricionales y funcionales de la lenteja y las ventajas de la extrusión es mediante el desarrollo de una harina de lenteja pulverizada con las ventajas mencionadas anteriormente. Esta harina puede ser utilizada como matriz alimentaria para la elaboración de otros productos alimenticios o como sustituto de otras harinas, como la de trigo, para mejorar sus características nutricionales. La harina de lenteja puede ser utilizada en diversas industrias, como panadería, producción de bebidas fermentadas y la elaboración de pastas, entre otras opciones (Rodríguez, 2018).

2.3 Objetivo

Determinar el efecto de la extrusión sobre las propiedades nutrimentales y de actividad fisiológica en la harina de lenteja verde y roja.

2.4 Materiales y métodos

Material biológico. A partir de las variedades de lenteja (*Lens culinars* M.) verde y roja (Apartado 1.4), se obtuvieron tres lotes de harina de lenteja: Lote 1 (Control 1) harina de lenteja cruda, Lote 2 (Control 2) harina de lenteja cocida y Lote 3 (Material de estudio) harina de lenteja extruida. A continuación, se describen cada uno de los procesos empleados para la obtención de los lotes:

Lote 1. Harina de lenteja cruda (Control 1).

A partir de la lenteja cruda, se realizó una reducción del tamaño de partícula a 0.25 mm en un molino eléctrico Goldelwall®. La harina obtenida se colocó en bolsas selladas al vacío hasta su uso.

Lote 2. Harina de lenteja cocida (Control 2).

La lenteja cruda se llevó a una cocción hidrotérmica tradicional a 94°C durante 15 minutos para la lenteja verde y por 5 minutos para la lenteja roja, ambas en una proporción 2:1 (agua:lenteja). Al término se eliminó por decantación el agua de cocción, posteriormente la lenteja se deshidrató a 70°C por 12 horas en un deshidratador marca Hamilton Beach®. Por último, se

redujo el tamaño de partícula a 0.25 mm en un molino eléctrico Goldelwall®. La harina obtenida se colocó en bolsas selladas al vacío hasta su uso.

Harina de lenteja extruida (Material de estudio).

Las semillas de lenteja en estado crudo de las dos variedades (verde y roja), se pulverizaron a un tamaño de partícula de 1.3 mm en un molino eléctrico Goldelwall®, posteriormente se acondicionaron a 50 % de humedad con agua purificada. Para la extrusión del pulverizado acondicionado, se utilizó un extrusor de tornillo simple, patente MX/a/200/016262, desarrollado en CICATA-IPN unidad Querétaro. Para un mayor control se manejaron dos zonas de calentamiento a una misma temperatura de 90 y 130 °C, la primera zona con la finalidad de precalentar la matriz alimentaria para posteriormente alcanzar con mayor facilidad la temperatura establecida en la segunda zona de calentamiento. Se utilizó un dado con apertura de 5 mm y una velocidad de rotación del tornillo de 15 rpm. Las muestras extruidas se atemperaron por 10 minutos y se deshidrataron a 70 °C/12 horas, posteriormente se pulverizaron a un tamaño de partícula de 1.3 mm en un molino eléctrico Goldelwall®, y se almaceno en bolsas selladas al vacío hasta su análisis.

Determinación de las propiedades nutricionales en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida

Extracción y cuantificación de proteína en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida

Para realizar la extracción y cuantificación de proteínas en las harinas de lenteja extruidas y las harinas control se siguió el método descrito por Osborne, modificado por Castillo (2012). Se tomaron 2 g de la harina de lenteja desgrasada y se disolvieron en 20 ml de agua destilada, se agitó por 2 horas / 4 °C, posteriormente las proteínas insolubles se removieron de la solución mediante centrifugación y se recuperó el sobrenadante. El precipitado se resuspendió en NaCl al 10 % (pH 7), se agitó por 2 horas / 4 °C y se centrifugó a 3500 rpm / 30 min recuperando el sobrenadante. Siguiendo los pasos descritos anteriormente se empleó una solución de NaOH 0.1 M. Por último, con el sobrenadante recuperado en cada una de las extracciones se ajustó el pH entre 4.2-4.5 con HCl (0.1 M) y se dejó reposar por 12 hrs a 4°C. Finalmente, se centrifugó

a 3500 rpm / 20 min y se eliminó el sobrenadante, el precipitado se llevó a la estufa a 40 °C / 24 hrs y se pesó para determinar el porcentaje de proteína extraída utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ proteína extraída} = \frac{(P1 - P2)}{m} (100)$$

Donde:

P1: peso inicial del papel filtro (contante).

P2: peso final del papel filtro (constante).

m: peso de la muestra.

Índice glucémico (IG) en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida

La determinación del índice glucémico se realizó de acuerdo con la norma ISO26642:2010(E), se reclutó un total de 10 sujetos humanos con previo ayuno de 12 horas, a los cuales se les proporcionó un consentimiento informado. Se desarrollaron dos curvas de glicemia: 1. La de glucosa estándar (concentración conocida) y 2. La correspondiente a harina de lenteja. Para la curva de glicemia de glucosa estándar se realizó una toma de muestra basal (tiempo 0), posteriormente cada sujeto ingirió 25 g de glucosa anhidra (estándar de glucosa) disuelta en 250 ml de agua purificada y se volvió a realizar una toma de muestra a los 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. Las muestras de sangre se obtuvieron por punción con una lanceta en la yema del dedo, se colocó una gota de sangre en una tira reactiva comercial (OneTouch) que fue leída en un glucómetro marca OneTouch ultra 2 y se registró el valor referente a la concentración de glucosa en la sangre analizada. En lo referente a la curva de glicemia de las harinas de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida a 90 y 130 °C de ambas variedades, se realizó una toma de muestra basal (tiempo 0), posteriormente con base en la cantidad de carbohidratos disponibles en las harinas de lenteja, cada sujeto ingirió 45 g para la variedad roja y 52 g para la variedad verde disueltos en 250 ml de agua purificada y se realizaron tomas de muestra a los 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. Las muestras fueron obtenidas realizando los mismos pasos descritos previamente

Los datos obtenidos se analizaron geoméricamente aplicando la regla trapezoidal y los cálculos se realizaron a partir de la siguiente fórmula:

$$IG = \frac{A1}{A2} (100)$$

Donde:

A1: área bajo la curva de glicemia 2 horas después de consumir la harina de lenteja.

A2: área bajo la curva de glicemia 2 horas después de consumir 25 g de glucosa (estándar).

El índice glucémico se mide en una escala del 1 al 100 y se divide en 3 categorías (Olivares, 2016):

- Alto ($IG \geq 70$): alimentos que incrementan rápido el nivel de glucosa en sangre por lo cual deben consumirse ocasionalmente.
- Intermedio (55-70): alimentos que causan un aumento intermedio de glucosa en la sangre.
- Bajo (≤ 55): alimentos que incrementan lentamente el nivel de glucosa en sangre por cual se recomienda su consumo diario.

Carga glucémica (CG) en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida

Una vez obtenidos los parámetros del índice glucémico, se determinó la carga glucémica, la cual se basa en el concepto del índice glucémico y proporciona una medida de la respuesta glucémica total de una persona cuando ingiere un alimento.

La CG es el resultado de multiplicar el valor del IG por la cantidad en gramos de los carbohidratos en la ración del alimento.

$$CG = \frac{IG * \text{g de carbohidratos en harina de lenteja}}{100}$$

Se consideran alimentos con carga glucémica alta aquellos que sobrepasan el valor de >20, medio, a los que se encuentran entre 19-11 y bajo, aquellos cuyos valores son inferiores a <10 (Salluca y Ajllahuanca-Callisaya, 2022).

Propiedades con actividad fisiológica

Cuantificación de la Fibra Dietaria Total (FDT), Fibra Soluble (FS) y Fibra Insoluble (FI).

Para la determinación de la FDT se siguió el método enzimático gravimétrico (AOAC, Métodos 985.29, 993.19 y 991.42), el cual fue descrito en materiales y métodos del Capítulo I (Apartado 1.4) y siguiendo el protocolo indicado en la Figura 2.

- Se pesó 1g de harina de lenteja
- pH 6/ α -amilasa/ 96°C/30 min
- pH 7.5/ proteasa/ 60°C/30 min
- pH 4.5/ amiloglucosidasa/ 60°C/30 min
- Poro abierto (FD insoluble)
- Poro cerrado (FD soluble)

Figura 2 Protocolo para la determinación de fibra dietaria total, soluble e insoluble por método enzimático gravimétrico en harina de lenteja verde.

Determinación de FD insoluble: La muestra llevada a digestión por las tres enzimas (α -amilasa, proteasa y amiloglucosidasa) se filtró utilizando un papel filtro de poro abierto y se realizaron lavados con 20 ml de agua destilada a 70 °C, el filtrado se recuperó en un matraz Erlenmeyer, y se realizaron dos lavados al papel filtro con 15 ml de etanol al 78 %, etanol al 95 % y acetona, por último, se secó el papel filtro a 70 °C/ 12 hrs y se realizó la corrección mediante la determinación de cenizas y proteína siguiendo la metodología citada en el Capítulo I.

$$FDI = \frac{(R_{muestra} - P_{proteínas} - P_{cenizas} - B)}{M} (100)$$

Donde:

Rmuestra: residuo de la muestra en gramos.

Pproteínas: peso de la proteína en gramos.

Pcenizas: peso de cenizas

B: blanco

“

Determinación de FD soluble: Al primer filtrado recuperado en el matraz Erlenmeyer de la digestión enzimática se le adicionaron 200 ml de etanol 98 % previamente calentado a 60 °C y se dejó reposar por 12 horas, posteriormente se filtró con un papel filtro de poro cerrado y se realizaron dos lavados con 15 ml de etanol al 78 %, etanol al 95 % y acetona, por último, de igual manera se realizó la corrección mediante la determinación de cenizas y proteína siguiendo la metodología citada en el capítulo I (Apartado 1.4).

$$FDS = \frac{(FDT - (FDI - P_{\text{proteínas}} - P_{\text{cenizas}} - B))}{M} (100)$$

Donde:

FDT: fibra dietaria total.

FDI: fibra dietaria insoluble.

Pproteínas: peso de la proteína en gramos.

Pcenizas: peso de cenizas en gramos.

B: blanco.

Polifenoles y Actividad antioxidante (ABTS⁺ y DPPH[•])

Extracción con solución madre: esta solución se utilizó para la determinación de polifenoles totales, ABTS⁺ y DPPH[•]. La extracción de la solución madre se realizó en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida de las variedades verde y roja. Como primer paso se pesaron 3 g de harina de lenteja y se colocaron en un tubo Falcón cubierto de aluminio, posteriormente se adicionaron 20 ml de metanol/agua (50:50) acidificado (pH 2) y se agitó con ayuda de un vortex a 220 rpm durante 10 minutos y se dejó incubar la muestra 1h/25°C, transcurrido el tiempo la muestra se centrifugo a 4000 rpm/10 min, se recuperó el sobrenadante en un matraz aforado de 50 ml cubierto de papel aluminio. Al residuo del tubo Falcón se le adicionaron 20 ml de acetona/ agua (70:30) y se repitieron los pasos mencionados previamente (agitación, incubación y centrifugación), el sobrenadante recuperado se juntó con el de metanol/agua. Por último, la solución madre se aforó a 50 ml con agua destilada y se almacenó a -20 °C hasta su uso.

Determinación de polifenoles totales: Se desarrolló una curva de calibración con una solución estándar de ácido gálico (1 %), reactivo *Folin-Ciocalteu* (1N) y NaCO₃ (20 %), las lecturas se realizaron a 765 nm utilizando agua destilada como blanco. Para la determinación de polifenoles totales en la harina de lenteja, se colocaron 100 µL de la solución madre en un tubo en ensayo cubierto de aluminio y se le adicionaron 7400 µL de agua destinada, 500 µL de reactivo Folin-Ciocateau, 2000 de carbonato de sodio (20 %) y se dejó reposar por 2 horas, finalmente, las lecturas se hicieron a 765 nm en un espectrofotómetro marca Thermo scientific® utilizando agua destilada como blanco. Con la curva de calibración construida y la ecuación de la recta calculada en la regresión lineal de los datos, los resultados se expresaron en equivalentes de ácido gálico/100 g de parte comestible (Nagaraj, N., R., y TM., 2014).

Método del radical ABTS⁺: se basa en la reducción de la coloración verde/azul producida por la reacción del radical ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS⁺) con el antioxidante presente en la muestra. Se realizó mediante la preparación del radical ABTS⁺ (7 mM) y persulfato de potasio (2.45 mM), los cuales se colocaron en una proporción 1:1 (2.5 ml:2.5ml) en un matraz Erlenmeyer cubierto de papel aluminio, se dejó reposar a 4°C por 12 horas. Transcurrido el tiempo, la mezcla se atempero y se diluyo con un stock de etanol hasta obtener una absorbancia de 0.7 (±0.02) a una longitud de onda de 734 nm a 30 °C, se utilizó etanol como blanco. Se tomaron 970 µL de la mezcla ión ABTS⁺ y se colocaron en un tubo Falcón, posteriormente se le adicionaron 30 µL de la solución madre. Las lecturas se realizaron cada minuto (0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 minutos) y los resultados se reportaron como porcentaje de inhibición utilizando la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de inhibición} = \frac{(\text{Abs inicial} - \text{Abs final})}{\text{Abs inicial}} (100)$$

Método del radical DPPH[•] : Se basa en la reducción de la absorbancia medida a 517 nm del radical 2,2-difeni-1-picrilhidracilo (DPPH[•]) el cual se reduce en presencia de antioxidantes manifestándose un cambio de color. Se tomaron 3.8 ml de reactivo DPPH[•] en un tubo Falcón y se agregaron 200 µL de la solución madre. Las lecturas se realizaron a 517 nm utilizando metanol (80 %) como blanco durante los tiempos 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 30 y 60 minutos y los

resultados se reportaron como porcentaje de inhibición utilizando la siguiente ecuación (Chung-Wa y Mengying, 2013).

$$\% \text{ de inhibición} = \frac{(\text{Abs inicial} - \text{Abs final})}{\text{Abs inicial}} (100)$$

Diseño y Análisis Estadístico.

Se utilizó un diseño factorial 2X4. Los factores de estudio fueron: factor 1 fue la variedad de lenteja con dos niveles (verde y roja) y el Factor 2 la temperatura del proceso de cocción con cuatro niveles (Control: 0, Hidrotérmico: 94°C) y (Extrusión: 90 y 130 °C). Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico JMP11 y comparados mediante un análisis de varianza de una vía, las medias fueron comparadas con una prueba de Tukey con un nivel de significancia $P \leq 0.05$.

2.5 Resultados y discusión

Efecto de la extrusión sobre los compuestos con aporte nutrimental en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida

Contenido de proteínas en harinas de lenteja verde y roja extruidas.

Los resultados correspondientes a la determinación del contenido de proteína en las harinas de lenteja verde y roja sometidas a extrusión se señalan en la Tabla 3. En el Capítulo I, apartado 1.5, la harina de lenteja verde en estado crudo (Control 1) tiene un contenido proteico (19.19 %) significativamente mayor ($\alpha=0.05$) que la procedente de lenteja roja (17.21 %) con una diferencia de 1.98 %. Cuando la harina de lenteja procede de la semilla llevada a una cocción por ebullición (Control 2), es posible advertir que el tratamiento hidro-térmico afecta el contenido de proteínas en las harinas de ambas variedades. La correspondiente a la variedad verde disminuyó en un 4.51 % con respecto al Control 1, en tanto que la procedente de la variedad roja tuvo una pérdida en el contenido de proteína de 3.53 % por efecto del tratamiento hidrotérmico. Es importante destacar que aun cuando la variedad verde tuvo una pérdida de proteínas menor que la variedad roja por efecto del proceso de cocción hidrotérmica, esta

diferencia no es estadísticamente significativa entre ambas variedades, por lo que puede advertirse que posterior a dicho tratamiento las harinas de ambas variedades contienen el mismo porcentaje de proteína.

Tabla 3 Contenido de proteína en harina de lenteja extruida (90 y 130 °C).

Harina	Extracción de Proteína [%]
Control 1 lenteja verde	19.19 ± 0.01a
Control 2 lenteja verde	14.68 ± 0.10cd
Lenteja verde extruida a 90 °C	18.84 ± 0.99ab
Lenteja verde extruida a 130 °C	6.88 ± 0.49e
Control 1 lenteja roja	17.21 ± 0.09abc
Control 2 lenteja roja	13.68 ± 0.77d
Lenteja roja extruida a 90 °C	16.11 ± 0.91bcd
Lenteja roja extruida 130 °C	5.02 ± 0.28e

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca. Control 1: lenteja cruda y control 2: lenteja cocida por ebullición.

Una vez observado el contenido de proteínas en las muestras control (1 y 2), comparativamente, la extrusión independientemente de la variedad, disminuye significativamente el contenido de proteína en la harina de lenteja, siendo mayor cuando se incrementa la temperatura de 90 a 130 °C. La harina de lenteja verde extruida a 90 °C presentó un valor de 18.84 % significativamente mayor ($\alpha=0.05$) que el control 2 (harina de lenteja verde procesa por ebullición). Igual comportamiento se presentó en la harina de lenteja roja extruida a 90 °C (16.11 %) con respecto a la harina de lenteja roja procesada por ebullición (13.68 %). Comparativamente con todos los tratamientos, la harina de lenteja extruida a 130 °C, tuvo la mayor perdida tanto en la lenteja roja (5.02 %) como en la verde (6.88 %), sin embargo, no presentaron diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre ambas variedades extruidas a dicha temperatura. De acuerdo con el análisis factorial, los factores variedad de lenteja ($p=<0.001$) y temperatura ($p=0.0002$) influyen significativamente sobre el contenido de proteína; sin embargo, la interacción variedad*temperatura son un factor que no presenta diferencia significativa ($p=0.51$).

Así mismo, la diferencia en el contenido de proteína entre un alimento cocido por ebullición y uno extruido puede variar por diversos factores, incluyendo el tipo de alimento, las condiciones en el proceso de extrusión y ebullición (Díaz et al., 2018). Por otro lado, la diferencia presentada

en el contenido de proteína en harina de lenteja cocida por ebullición y extrusión a 90 °C puede estar relacionado con la lixiviación de proteínas en el agua de cocción. La disminución presentada en el contenido de proteína a una temperatura de extrusión de 130 °C en comparación a 90 °C se debe al incremento de la temperatura ya que, de acuerdo con (Bala et al., 2022) la mayor parte de las proteínas experimentan una desnaturalización entre los 50 y 60 °C, derivado de la desnaturalización, el contenido de proteínas en una matriz alimentaria puede disminuir.

La lenteja al ser extruida a 90 °C presenta un mayor contenido de proteína en comparación al reportado por Flores et al., (2016) en lenteja y haba cruda (10.6 % y 13.0 %). Por otro lado, Gómez et al (2020) reportó un contenido de proteína inferior en harina de trigo y maíz (10.70 y 8.0 %) extruidas a una temperatura de 130 °C y 35 rpm. Así mismo, Vega et al (2023) reportó un contenido de proteína similar el harina de lenteja extruida (20.0 %) e inferior en harina de arroz extruida (7.20 %).

Una de las ventajas que ofrece el proceso de extrusión es la inactivación de inhibidores proteicos presentes de manera natural en el producto inicial. Durante la extrusión, y por efecto de a temperatura, se produce un desenrollamiento de las cadenas proteicas, elevando así su digestibilidad. Por otro lado, también se genera la formación de un complejo almidón-proteína, en el cual las moléculas de almidón encapsulan a las proteínas y las protegen de un posible daño generado por la temperatura presente (Contreras, 2017).

Índice Glucémico (IG) en harinas de lenteja verde y roja extruidas.

El índice glucémico (IG) es una medida que indica cómo un alimento afecta los niveles de glucosa en sangre después de su consumo en comparación con un alimento de referencia, como la glucosa o el pan blanco. Algunos factores que influyen en el incremento del IG en un alimento son: tipo de carbohidratos presentes, cocción, contenido de fibra, grasas y proteína (Estefes-Duarte et al., 2022).

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en la determinación del índice glucémico (IG) en harina de lenteja extruida (90 y 130 °C) para las variedades verde y roja.

El control 1 (Harina de lenteja verde cruda) tiene un IG de 21.94, valor que se incrementa a 28.60 en el control 2 (Harina de lenteja verde cocida). En este sentido, la extrusión incrementa significativamente el IG en la harina de lenteja verde, este incremento es mayor conforme mayor es la temperatura de extrusión: IG a 90 °C (30.50) vs IG a 130 °C (32.18). El análisis estadístico indica una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre las temperaturas de extrusión (90 y 130 °C) y sus controles (cocción por ebullición y crudo).

Tabla 4 Determinación de índice glucémico en harina de lenteja verde y roja extruida (90 y 130 °C).

Harina	IG
Control 1 lenteja verde	21.94 ± 1.25f
Control 2 lenteja verde	28.60 ± 1.12e
Lenteja verde extruida a 90 °C	30.50 ± 1.17 cd
Lenteja verde extruida a 130 °C	32.18 ± 0.87ab
Control 1 lenteja roja	22.18 ± 1.03f
Control 2 lenteja roja	29.56 ± 1.36de
Lenteja roja extruida a 90 °C	31.39 ± 1.27bc
Lenteja roja extruida 130 °C	33.14 ± 0.92a

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca. Control 1: lenteja cruda y control 2: lenteja cocida por ebullición.

Por otra parte, la harina de lenteja roja presenta un comportamiento similar a la variedad verde, el control 1 presentó el menor IG (22.18), incrementando cuando la lenteja roja es llevada a cocción por ebullición (29.56). La extrusión presentó en la harina de lenteja roja un incremento en el IG siendo mayor a 130 °C (33.14) que a 90 °C (33.14). Estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) con respecto a los controles (crudo y cocción por ebullición), sin embargo, entre variedades no existe diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) al utilizar el mismo tratamiento. Es importante señalar que los valores obtenidos de ambas variedades de lenteja en cada uno de los tratamientos empleados se encuentran dentro del rango para alimentos considerados como índice glucémico bajo (≤ 55) (Manuzza et al., 2018). Con base en el análisis factorial, la variedad de lenteja ($p<0.001$) y temperatura ($p=0.0002$) son factores que influyen significativamente sobre la respuesta del IG; no así su interacción (variedad*temperatura) la cual no presenta diferencia significativa ($p=0.70$).

El incremento en el índice glucémico en cada una de las variedades está directamente relacionado con el proceso de cocción, ya que durante la cocción de los alimentos se produce una hidrólisis de los nutrientes que lo componen, en el caso de los hidratos de carbono, durante el proceso de cocción se liberan moléculas de glucosa procedentes del almidón por lo cual el IG aumenta (Manuzza et al., 2018). La diferencia presentada en el índice glucémico entre la harina de lenteja cocida por ebullición y la extruida a 90 y 130 °C se relaciona con los cambios estructurales generados por la temperatura y presión generada, así como una mayor gelatinización del almidón, aumentando la digestión enzimática al ser consumido.

Los valores obtenidos se asemejan a los reportados por Olivares (2016) en garbanzo cocido (31) y lenteja cocida (26), por otro lado, Ostrowska (2022) reporta un IG de 30 en lenteja roja cocida y 26 en lenteja verde cocida. Así mismo, Shaikh et al (2020) reportó un IG de 83.6 en harina de maíz extruida, siendo superior al obtenido en ambas variedades de lenteja. De igual manera, Na-Nakorn et al (2019) reportó un IG superior en harina de arroz extruido (86.2).

Carga glucémica (CG) en harinas de lenteja verde y roja extruidas.

La carga glucémica (CG) es una medida que tiene en cuenta tanto la cantidad de carbohidratos en un alimento como su índice glucémico (IG), lo que proporciona una visión más completa de cómo un alimento afecta los niveles de glucosa en sangre, algunos factores que incrementan la CG de un alimento son, cantidad y tipo de carbohidratos, el IG, la combinación de nutrientes y el procesamiento son factores importantes que pueden influir en la carga glucémica de un alimento (Manuzza et al., 2018).

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para la determinación de la carga glucémica en harina de lenteja verde y roja cruda extruida a 90 y 130 °C.

Tabla 5. Determinación de carga glucémica en harina de lenteja cruda, cocida y extruida (90 y 130 °C).

Harina	CG
Control 1 lenteja verde	5.48 ± 0.31f
Control 2 lenteja verde	7.15 ± 0.28e
Lenteja verde extruida a 90 °C	7.62 ± 0.29 cd
Lenteja verde extruida a 130 °C	8.04 ± 0.21ab
Control 1 lenteja roja	5.54 ± 0.25f
Control 2 lenteja roja	7.39 ± 0.34de
Lenteja roja extruida a 90 °C	7.84 ± 0.31bc
Lenteja roja extruida 130 °C	8.28 ± 0.22a

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca. Control 1: lenteja cruda y control 2: lenteja cocida por ebullición.

La harina de lenteja cruda verde presentó una carga glucémica de 5.48, posterior a la cocción por ebullición fue de 7.15, representado un incremento de 1.67. En cuanto al proceso de extrusión a 90 °C la carga glucémica fue de 7.62 y 8.04 a 130 °C presentando una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre los tratamientos empleados. En cuanto a la harina de lenteja cruda roja presentó una carga glucémica de 5.54, incrementando un 1.85 posterior al proceso de cocción por ebullición (7.39). Por otro lado, la extrusión a 90 °C presentó una carga glucémica de 7.84 y 8.28 a 130 °C. En análisis estadístico no muestra diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre la harina de lenteja verde y roja al emplear un mismo tratamiento. Los valores obtenidos en ambas variedades de lenteja, verde y roja se encuentran por debajo de 10, por lo cual se consideran como un alimento con carga glucémica baja (Manuzza et al., 2018). Como pudo apreciarse los factores que influyen significativamente en esta variable de respuesta fueron tanto la variedad de lenteja ($p<0.001$) como la temperatura ($p=0.003$); su interacción (variedad*temperatura) no presenta diferencia significativa ($p=0.70$).

La carga glucémica hace referencia a la cantidad de carbohidratos asimilables que proporciona un alimento, el cual puede presentar un incremento posterior al someter el alimento a un proceso de cocción, al producirse una hidrólisis de los carbohidratos disponibles que contiene (AMD, 2021). Los valores obtenidos son similares a los reportados por Manuzza et al., (2018) para lenteja cruda (8) y garbanzo crudo (9). Así mismo se reportó una CG de 19 para arroz integral hervido. Por otro lado, Olivares (2016) reportó una CG de 27 para trigo, 13 en lenteja cocida y 53 en harina de maíz. Por otro lado, Salluca et al (2022) reportó una carga glucémica mayor en harina de arroz blanco extruida (28) y maíz (20). La carga glucémica en harinas

extruidas y cocidas por ebullición puede incrementar debido a las condiciones utilizadas durante el proceso, al aumentar la digestibilidad de los carbohidratos, pretratamiento como la refinación disminuyen los niveles de fibra lo cual aumenta los niveles de carga glucémica e índice glucémico.

Determinación de propiedades con actividad fisiológica

Fibra Dietaria Total (FDT), Fibra Dietaria Insoluble (FDI) y Fibra Dietaria Soluble (FDS) en harinas de lenteja verde y roja.

En la Tabla 6 se exponen los valores obtenidos para fibra dietaria total, conformada a su vez por la suma de su fracción soluble e insoluble. Para la harina de lenteja cruda, en cuanto al control crudo la variedad verde presentó los valores más altos de FDT (26.90 %), FDTs (3.10 %) y FDI (23.80 %) en comparación a la variedad roja (23.21 %, 2.28 % y 20.92 %) presentando una diferencia entre variedades de 3.73 % en FDT, 0.82 % de FDS y 2.88 % para FDI; sin embargo, no se presentó diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre ambas variedades en cada una de sus fracciones.

Posterior al tratamiento hidro-térmico, en la harina de lenteja verde se obtuvo un porcentaje de 38.68 % para FDT, 7.36 % de FDS y 31.32 % para FDI, representando un aumento de 11.75 %, 4.26 % y 7.36 % respectivamente. Con respecto a la harina de lenteja roja se obtuvieron unos valores para FDT de 31.59 %, 6.65 % para FDS y FDI de 24.93 %, representando de igual manera un aumento de 8.28 % en FDT, 4.37 % para FDS y 4.02 de FDI, presentando diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) solo en FDI y FDT.

La harina de lenteja cocida por extrusión presentó los valores más altos en cada una de sus fracciones (FDT, FDI y FDS), en cuanto a la harina de lenteja verde, los valores obtenidos a 130 °C (52.82, 40.14 y 12.37 %) fueron superiores a los de 90 °C (44.87, 35.06 y 9.81 %). Similarmente ocurrió en la lenteja roja, siendo superiores los valores obtenidos a 130 °C (42.02, 32.32 y 9.69 %) que a 90 °C (34.62, 27.05 y 7.75 %). Siendo la lenteja verde extruida a 130 °C la que presentó los valores más alto y la lenteja roja extruida a 90 °C los más bajos, existiendo diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) con la lenteja verde extruida a 90 °C y la lenteja roja extruida a 130 °C.

Tabla 6 Contenido de fibra dietaria total, soluble e insoluble en harina de lenteja cruda y cocida.

Harina	FDT (%)	FDS (%)	FDI (%)
Lenteja verde cruda	26.90 + 0.91f	3.10 + 0.90e	23.80 + 1.10cd
Lenteja verde cocida	38.68 + 1.72cd	7.36 + 0.92d	31.32 + 1.80b
Lenteja verde extruida a 90 °C	44.87 + 1.60b	9.81 + 0.45b	35.06 + 1.68b
Lenteja verde extruida a 130 °C	52.82 + 1.21a	12.37 + 0.85a	40.44 + 1.44a
Lenteja roja cruda	23.21 + 0.48f	2.28 + 0.61e	20.92 + 1.07d
Lenteja roja cocida	31.59 + 1.56e	6.65 + 0.52d	24.93 + 1.04c
Lenteja roja extruida a 90 °C	34.62 + 1.45de	7.57 + 0.97cd	27.05 + 0.99c
Lenteja roja extruida 130 °C	42.02 + 0.54bc	9.69 + 0.86bc	32.32 + 1.34b

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca.

Por lo tanto, es posible apreciar un mayor aumento en cada una de sus fracciones de fibra dietaria en la harina de lenteja verde en comparación a la harina de lenteja roja sometidas a un procesamiento hidro-térmico y de extrusión, sin embargo, solo se aprecia diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) en la lenteja verde extruida a 130 °C en cada una de sus fracciones con respecto a la variedad y tratamiento empleado. Así mismo, es posible apreciar un mayor contenido de FDI en ambas variedades de lenteja (verde y roja) sin importar el tratamiento empleado (cruda, cocida por ebullición y extruida). A diferencia de las variables de respuesta anteriores la FDT, FDI y FDS se ven afectadas por los Factores de estudio independientes y por la interacción entre ellos FDT ($p<0.001$, <0.001 y 0.005), FDI ($p<0.001$, <0.001 y 0.001) y FDS ($p<0.001$ y 0.001) con excepción de la interacción variedad*temperatura ($p=0.10$).

En FDT la lenteja verde y roja (cruda y cocida) destaca frente a otras legumbres como haba (25 %), garbanzo (12.2 %) y soya (9.3 %) (Delgado-Andrade et al., 2016). Posterior a la cocción, el incremento en la FDT y su fracción soluble e insoluble, se debe a la formación de complejos entre almidones, proteínas y taninos, los cuales son capaces de resistir la acción enzimática. Los valores obtenidos se asemejan a los reportados en harina de lenteja por (De Almeida Costa et al., 2006) siendo de 21.4 % para FDI y de 1.37 en FDS. Por otro lado, (Dueñas et al., 2016) reporta contenidos semejantes de FDI en harina de lenteja cruda, cocida y germinada (24.46, 21.01 y 18.85 %), reportando un contenido superior en FDS para harinas de lenteja cocida y germinada (17.6 % y 12.8 %).

Polifenoles totales y actividad antioxidante en harinas de lenteja verde y roja.

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en la cuantificación de polifenoles totales y actividad antioxidante (AAO) en harina de lenteja verde y roja (cruda y cocida). En harina de lenteja verde y roja cruda, se obtuvo un total de 83.52 y 56.69 mg AG/100g de polifenoles totales, existiendo una diferencia de 26.83 mg AG/100g entre ambas variedades de harina de lenteja. En cuanto a la harina de lenteja verde sometida a un proceso de cocción por ebullición, se observó un contenido de polifenoles totales de 53.13 mg AG/100g, representando una disminución de 30.39 mg AG/100g con respecto a la harina de lenteja cruda, mientras que para la harina de lenteja roja se obtuvo un valor de 51.09 mg AG/100g, representando una pérdida de 5.63 mg AG/100g con respecto a la harina de lenteja cruda. Por otro lado, el contenido de polifenoles totales en harina de lenteja verde extruida a 90 °C (48.91 mg AG/100g) fue superior al presentado en la extrusión a 130 °C (33.36 mg AG/100g). Así mismo, la lenteja roja extruida a 90 °C (44.13 mg AG/100g) presentó un mayor contenido de polifenoles totales en comparación a la extruida a 130 °C (30.35 mg AG/100g).

La harina de lenteja verde cruda, cocida por ebullición y extruida presentó un mayor contenido de polifenoles totales en comparación a la harina de lenteja roja cruda, cocida por ebullición y extruida, existiendo así mismo una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre variedades y tratamiento empleados, con excepción de la harina de lenteja verde extruida a 90 °C y la harina de lenteja roja cocida por ebullición entre las cuales no se presenta diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$). Es importante mencionar que estadísticamente, la variedad de lenteja, la temperatura y su interacción (variedad*temperatura) influyen significativamente en el contenido de polifenoles totales ($p<0.001$, <0.001 y <0.001).

Los valores obtenidos son superiores a los obtenidos por Vicente (2017) para distintas variedades de lenteja, (27.90 mg AG/100g para la variedad verde y 16.59 mg AG/100g para la variedad roja), en lenteja verde sin cascarilla, los mismos autores reportan un valor de polifenoles totales de 16.49 mg AG/100g con lo que concluyen que diferencia en el contenido de polifenoles totales entre la harina de lenteja verde y roja se debe a la concentración de polifenoles en la cascarilla de lenteja verde. Algunos ejemplos de polifenoles presentes en la lenteja son los derivados del ácido hidroxibenzoico e hidroxicinámico, flavonoides como

flavonoles, flavonas, flavanonas, antocianidinas e isoflavonas, y oligómeros como las proantocianidinas (Lorzano et al., 2018).

Tabla 7 Cuantificación de polifenoles totales y actividad antioxidante en harina de lenteja cruda y cocida.

Harina	Polifenoles totales [mg AG/100g]	ABTS+ [% de inhibición]	DPPH' [% de inhibición]
Lenteja verde cruda	83.52 + 0.58a	75.70 + 0.38a	78.33 + 0.54a
Lenteja verde cocida	53.13 + 0.60c	71.34 + 0.92b	72.35 + 0.76b
Lenteja verde extruida a 90 °C	48.91 + 0.96d	65.26+ 0.60c	64.99 + 0.42c
Lenteja verde extruida a 130 °C	33.36 + 0.09f	47.79 + 0.74g	54.19 + 0.92de
Lenteja roja cruda	56.69 + 0.85b	58.80 + 1.0d	54.69 + 0.57d
Lenteja roja cocida	51.09 + 0.09d	56.37 + 0.64e	52.30 + 0.37e
Lenteja roja extruida a 90 °C	44.13 + 0.66e	52.05 + 0.75f	44.57 + 0.90f
Lenteja roja extruida 130 °C	30.35 + 0.47g	46.30 + 0.34g	36.63 + 0.90g

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca.

Así mismo, en la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos de la evaluación en inhibición del radical ABTS⁺, presentado un mayor porcentaje de inhibición la harina de lenteja verde cruda (75.70 %) en comparación a la harina de lenteja roja cruda (58.80 %), representado una diferencia de 16.9 %. Posterior al proceso de cocción por ebullición la harina de lenteja verde presentó un porcentaje de inhibición de 71.34 %, representando una pérdida de 4.36 %, mientras que la harina de lenteja roja cocida por ebullición presentó un porcentaje de inhibición de 56.37 %, sufriendo una pérdida de 2.43 %, dichos valores presentan una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre variedades y tratamiento empleados. En cuanto al proceso de extrusión, la harina de lenteja verde presentó un porcentaje de inhibición de 65.26 % a 90 °C, y disminuyó al incrementar la temperatura (130 °C) a 47.79 %, de igual manera la harina de lenteja roja presentó un mayor porcentaje de inhibición a 90 °C (52.05 %) en comparación a la extrusión a 130 °C (46.30 %).

Por otro lado, en la inhibición del radical DPPH' también se puede apreciar una disminución posterior al proceso de cocción por ebullición, en la harina de lenteja verde cruda se obtuvo un valor de 78.33 %, posterior a su cocción disminuyó a 72.35 %, representando una pérdida de 5.98 %, mientras que la harina de lenteja roja cruda presenta un 54.69 %, y posterior a su cocción fue de 52.30 %, representando una pérdida de 2.39 %. En cuanto al proceso de

extrusión, la lenteja verde a 90 °C presentó un porcentaje de inhibición de 64.99 %, representando una pérdida de 10.8 % al incrementa la temperatura de extrusión a 130 °C (54.19 %). Mientras que la lenteja roja presentó un porcentaje de inhibición de 44.57 % a 90 °C y 36.63 % a 130 °C, representado una pérdida de 7.94 % por el incremento de la temperatura de extrusión. Los resultados obtenidos muestran diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre variedades y tratamientos empleados, con excepción de la harina de lenteja verde extruida a 130 °C y la harina de lenteja roja cocida por ebullición. De acuerdo con el análisis factorial, la variedad de lenteja, temperatura e interacción variedad*temperatura influyen en la actividad antioxidante ABTS⁺ ($p<0.001$, <0.001 y <0.001) y DPPH* ($p<0.001$, <0.001 y <0.001).

En un estudio realizado por Gutiérrez et al (2019) los métodos de cocción doméstica afectan o modifican el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante hasta en un 40 %, dependiendo de la temperatura y tiempo que se utilice.

2.6 Conclusión

La cocción tradicional y la extrusión son procesos que tienen un efecto sobre el contenido de proteína y fibra dietaría total, soluble e insoluble, así mismo como en polifenoles totales y su actividad antioxidante, estos cambios a su vez están relacionados con la variedad verde y roja. Existe un aumento en el contenido de las fracciones de fibra dietaria soluble e insoluble, caso contrario en la extracción de proteína, polifenoles totales y su actividad antioxidante, donde se presenta una disminución en los valores posterior al proceso de cocción, lo cual se debe al daño generado por la temperatura empleada durante el tratamiento hidro-térmico y de extrusión en cada una de las estructuras. Así mismo, el índice y carga glucémica en harina de lenteja verde y roja incrementa posterior a la cocción por ebullición y extrusión a 90 y 130 °C, dicho efecto se relaciona a las temperaturas empleadas en ambos tratamientos al generarse una hidrólisis del almidón presente en la matriz alimentaria.

2.7 Referencias bibliográficas

- Ahmed, ., El-Bassiony, ., Elmalt, ., & Ibrahim, . (2015). Identification of potent antioxidant bioactive peptides from goat milk proteins. *Food Research International*, 80-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.032>
- Aires, D., Capdevila, N., & Segundo, M. (2005). Ácidos grasos esenciales. *ELSEVIER Vol. 24. Núm. 4*, 96-102. Obtenido de <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-acidos-grasos-esenciales-13073447>
- Álvarez, E., & González, P. (2006). La fibra dietética. *Nutr. Hosp*, 61-72.
- AMD. (27 de octubre de 2021). *Asociación Mexica de Diabetes*. Obtenido de <https://www.amdiabetes.org/post/qu%C3%A9-es-el-%C3%ADndice-y-la-carga-gluc%C3%A9mica>
- Anuradha, R., Pradhuman, Y., Lakshmi, K., Mishra, K., Aditya, J., & Pattanayak, A. (2017). Effect of dehulling, germination and cooking on nutrients, anti-nutrients, fatty acid composition and antioxidant properties in lentil (*Lens culinaris*). *Food Sci Technol* 54(4), 909–920. doi:DOI 10.1007/s13197-016-2351-4
- Arqueroz, S. (15 de Marzo de 2023). *Universidad deValladolid*. Obtenido de Desarrollo de un snak extrusionado de harina de lenteja y maíz dirigido a la población con intolerancia al gluten: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42513/TFG-M-N2044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bala, S., Kinabo, J., & Uebersax, M. (3 de Junio de 2022). Nutrient profile and effect of processing methods on the composition and functional properties of lentils (*Lens culinaris* Medik): A review. *Legume Science published by Wiley Periodicals LLC*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1002/leg3.156>
- Blasco, P. (2022). *Repositorio Institucional de Documentos Universidad de Zaragoza*. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/117775>
- Cabrera, J., & Cárdenas, M. (2006). Importancia de la fibra dietética para la nutrición humana. *Rev Cubana Salud Publica* V32 n4, 20-55.
- Carballo, C. (2011). Soberanía alimentaria y producción de Alimentos en Argentina. En M. K. de Gorba, C. Carballo, M. Paiva, & V. Abajo, *Seguridad y Soberanía Alimentaria* (págs. 11-48). Buenos Aires: Buenos Aires: Colección Cuadernos.

- Contreras, B. (24 de Abril de 2017). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21521>
- De Almeida Costa, G. E., Queiroz-Monici, K. d., Machado Reis, S. M., & Costa de Oliveira, A. (2006). Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food Chemistry*, 328-329.
- Delgado-Andrade, C., Olías, R., Jiménez-López, J., & Clemente, A. (6 de mayo de 2016). *Rev Arbor*, 192(779), a131. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2016.779n3003>
- Delgado-Andrade, C., Olías, R., Jiménez-López, J., & Clemente, A. (6 de Mayo de 2016). Aspectos de las legumbres nutricionales y beneficiosos para la salud humana. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2016.779n3003>
- Díaz, R., Silverio, C., Edison, O., & Criollo, J. (17 de Julio de 2018). Pruebas de cocción de pastas alimenticias elaboradas con harina de trigo - almidón de banano. *Revista Científica Cumbres*, 4(1), 63-73. doi:<https://doi.org/10.48190/cumbres.v4n1a6>
- Dueñas, M., Sarmiento, T., Aguilera, Y. B., Mollá, E., Esteban, R., & Martín-Cabrejas, M. (2016). Impact of cooking and germination on phenolic composition and dietary fibre fractions in dark beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and lentils (*Lens culinaris* L.). *Food Science and Technology*, 74.
- Estefes-Duarte, J., González-Lemus, U., Hernández-Fuentes, A., Jottar-Bernal, A., & Campos-Montiel, R. (2022). *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 8(15), 15-26. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icap/issue/archive>
- Flores, V., Chuck, C., De la Rosa, M., Orona, J., Rodríguez, W., & Salinas, A. (2016). Centro de Investigación y Desarrollo de Proteínas (CIDPRO). 1(2), 68-72 . Obtenido de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/1/13.pdf>
- Fuertes, P. (2022). *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de València*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/170036>
- Gómez, M., Bravo-Núñez, Á., & Paesani, C. (Octubre de 2020). Effect of extrusion of whole-grain maize flour on the characteristics of gluten-free cookies. *Food Science and Technology*, 132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109931>
- Gonzáles, A. (2000). Efecto del tratamiento térmico sobre el contenido de fibra dietética total, soluble e insoluble en algunas leguminosas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición Vol. 50(3)*, 281-285.

- Gutiérrez, J., Santiago, Y., Hernández, A., Pinedo, J., López, G., & López, C. (2019). Influence of cooking methods on antioxidant activity and bioactive compounds of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Rev de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío Vol 11(1)*, 53-68. doi:doi.org/10.21640/ns.v11i22.1685
- IMSS. (16 de junio de 2015). *IMSS*. Obtenido de <https://imss.gob.mx/salud-en-linea/nutricion>
- JÁE. (22 de julio de 2021). *Legumbres, cultivo sostenible*. Obtenido de <https://legumbresjae.com/legumbres-jae-cultivo-sostenible/#:~:text=En%20particular%2C%20las%20lentejas%20son,4%20kg%20CO2%2Fkg.&text=Las%20legumbres%20permiten%20un%20cultivo%20sostenible>.
- Lorzano, A. J., Ruiz, J. E., Sansón, D., Hernández, J., Sotelo, J. U., & Mireles, A. I. (2018). Evaluación de actividad antioxidante en germinados de lenteja (*Lens culinaris*) producidos bajo luz artificial en distintos rangos nanométricos. *Jóvenes en la ciencia Vol 4(1)*, 12-17. Obtenido de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2336>
- Manuzza, M., Brito, G., Echeagaray, N., & López, L. (9 de marzo de 2018). *DIAETA*, 10-18. Obtenido de <http://www.aadynd.org.ar/descargas/dieta/04-Manuzza-Indice.pdf>
- Martínez, M. (2016). *Universidad de Valladolid. Facultad de Medicina*. Obtenido de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/18140>
- Mendoza, A. (27 de Julio de 2023). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/32039>
- Mollinedo, A., & Benavides, G. (2014). *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 41, 2133-2136. Obtenido de http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-37682014000200002&lng=es.
- Oblitas, C. (2017). Tecnologías emergentes en la preservación de alimentos . *Caxamarca* 16(2), 151-161.
- Oblitas, J. (2017). *Revista Caxamarca*, 16(2), 151 – 161. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3108>
- Olivares, M. (Agosto de 2016). *Universidad Veracruzana*. Obtenido de [/https://www.uv.mx/saisuv/files/2016/08/indice-glucemico-de-los-alimentos.pdf](https://www.uv.mx/saisuv/files/2016/08/indice-glucemico-de-los-alimentos.pdf)

- Olmedilla, B., Farré, R., Asensio, C., & Martín, M. (2010). Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *Revista Actividad Dietética*, 72-76.
- Oomah, B. D., Caspar, F., Malcolmson, L. J., & Bellido, A. (2010). Phenolics and antioxidant activity of lentil and pea hulls. *Food Research International Vol 44*, 436-441.
- Ostrowska, L. (2022). *empendium*. Obtenido de <https://empendium.com/manualmibe/para-pacientes/print?id=302363>
- Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). Phenolic Compounds in Food. *Revista Boliviana de Química, Vol 31(2)*, 68-81.
- Rodríguez, A. (14 de Mayo de 2018). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24913>
- Ruiz-Armenta, X., Zazueta-Morales, J., Aguilar-Palazuelos, E., Delgado-Nieblas, C., López-Díaz, A., Camacho-Hernández, L., . . . Martínez-Bustos, F. (Enero de 2018). Effect of extrusion on the carotenoid content, physical and sensory properties of snacks added with bagasse of naranjita fruit: optimization process. *CYTA - JOURNAL OF FOOD*, 16(1), 172-180. doi:<https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1368717>
- Salluca, T., & Ajllahuanca-Callisaya, V. (2022). Índice glicémico y carga glicémica de Galletas de Chuño. *Rev.Cs.Farm. y Bioq*, 10(1), 33-45. doi:<https://doi.org/10.53287/fhcw4226lh68n>.
- Sánchez, V. (2014). *Repositorio del Instituto Politécnico Nacional CICATA-QRO*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/13043>
- Santos, L., & Martínez, M. (2023). *Repositorio Institucional UPV*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/194732>
- Shaikh, F., Mohsin, T., Mustafa, G., & Hasnain, A. (25 de Junio de 2020). Structural, functional and digestibility characteristics of sorghum and corn starch extrudates (RS3) as affected by cold storage time. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 3048-3054. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.105>
- Silva, R. (21 de marzo de 2023). *Repositorio UNJFSC*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14067/7752>
- Torres-González, M., Jiménez-Munguía, M., & Bárcenas-Pozos, M. (2016). Harinas de frutas y/o leguminosas y su combinación con harina de trigo. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 94-102.

- Urbina-Dicao, K., Santacruz-Terán, S., Guapi-Álava, G., Revilla-Escobar, K., & Aldas-Morejon, J. (19 de Septiembre de 2023). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10(2), 33-41. doi:<https://doi.org/10.23850/24220582.5708>
- Valls, J. (2003). *Efecto del procesamiento sobre el valor nutricional de los alimentos*. Caracas. Venezuela.: Departamento de Producción de Impresos de la Universidad Simón Bolívar. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10872/3198>
- Vega, C., Pérez-Bravo, F., & Mariotti-Celis, M. (2023). Amount, stability, and digestibility of carbohydrates after the extrusion process: Impact on the glycemic index of flours commonly consumed in Chile. *Rev Chil Nutr*, 50(2), 233-241. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182023000200233>.
- Vicente, L. (23 de Septiembre de 2017). *Evaluación de la capacidad antioxidante y su relación con la composición fenólica en lentejas*. Obtenido de https://gredos.usal.es/bitstream/10366/137920/1/TG_VICENTE%20PASUCAL,%20Laura_%20Evaluación%20de%20la%20capacidad%20antioxidante.pdf
- Vidal, M., Latorre, M., & Comas-Basté, O. (9 de Febrero de 2021). *Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2445/173889>

CAPÍTULO III. Determinación de la calidad tecno-funcional en harina de lenteja de dos variedades extruidas

3.1 Resumen

El efecto de la extrusión sobre las propiedades tecno-funcionales en harinas es de interés, ya que mejora parámetros como cohesión, adhesión, índice de absorción y solubilidad de agua, entre algunos otros. Teniendo como objetivo evaluar la calidad tecno-funcional de harina de dos variedades de lenteja extruida. Se utilizó lenteja (*Lens culinaris* M.) verde y roja. Fueron molidas en crudo, acondicionadas (humedad 50 %) y extruidas (90 y 130 °C). Los extruidos se deshidrataron (70 °C/12hrs) y molieron. Las variables de respuesta fueron dureza, cohesión y adhesión (por TPA), consistencia (de manera subjetiva), índice de absorción y solubilidad de agua (Anderson et al., 1969), color (por colorimetría) y microscopia electrónica de barrido (MEB). El control 1 fue harina de lenteja cruda y el 2 harina de lenteja cocida (94 °C por 15 minutos para la lenteja verde y 5 para la roja). Los resultados obtenidos muestran un incremento de dureza en harina extruida a 90 y 130 °C de lenteja verde (22.72 y 30.20 N) y roja (21.01 y 24.39 N) con respecto a sus controles 1 y 2. Las variables de cohesión y adhesión en las harinas extruidas a 90 y 130 °C de lenteja verde y roja, presentaron una disminución con respecto a sus controles, sin embargo, este efecto es considerado positivo al mejorar la textura de la matriz alimentaria. El ÍAA en harina de lenteja roja extruida (90 y 130 °C) fue de 4.76 y 5.60 g de gel/d de muestra, siendo superior al obtenido en la variedad verde (4.68 y 5.26 g de gel/d de muestra), sin embargo, ambas variedades presentaron diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) con respecto a sus controles 1 y 2. Así mismo, el índice de solubilidad de agua fue mayor en cada uno de los tratamientos empleados (control 1, control 2 y extruida a 90 y 130 °C) en la harina de lenteja roja (19.19, 9.71, 14.86 y 9.15 %) en comparación a la variedad verde (15.28, 8.93, 13.98 y 8.50 %). Finalmente, la microscopia electrónica de barrido evidenció la formación de complejos entre los cuerpos proteicos y gránulos de almidón en la harina de lenteja extruida (90 y 130 °C). En conclusión, la extrusión mejora las propiedades tecno-funcionales estudiadas, siendo más evidentes a una temperatura de 130 °C con respecto a sus controles 1 y 2.

Palabras clave: textura, microscopía electrónica y matriz alimentaria.

3.2 Estado del Arte

Importancia de la lenteja como matriz alimentaria

La lenteja es importante desde el punto de vista agrícola, alimenticio y nutricional. Así mismo, presenta una gran relevancia como matriz alimentaria, que se refiere al conjunto de componentes nutrientes y no nutrientes de los alimentos y sus relaciones moleculares (Golzi et al., 2023). La importancia de la lenteja como matriz alimentaria radica en, su valor nutricional debido a su alto contenido de proteína, fibra dietaria, vitaminas (especialmente del complejo B) y minerales (como hierro, zinc y magnesio), fácil accesibilidad por su bajo costo, versatilidad para ser utilizada en la elaboración de pastas, ensaladas, sopas o sustituto de proteínas de origen animal, sostenibilidad alimentaria ya que su cultivo es de bajo impacto ambiental en comparación a la producción de proteínas de origen animal, y por diversos beneficios para la salud, incluyendo la reducción del riesgo de enfermedades crónicas como enfermedades cardíacas, diabetes tipo 2 y ciertos tipos de cáncer (Carboni et al., 2020). Sin embargo, las lentejas de manera natural contienen compuestos anti-nutricionales que pueden limitar la absorción de sus nutrientes. Estos compuestos incluyen inhibidores de amilasa y proteasa, ácido fítico, taninos y oligosacáridos como rafinosa, estaquiosa y verbascosa que pueden interferir con la digestión y asimilación de proteínas y carbohidratos. Sin embargo, métodos tradicionales como el remojo, la germinación, la cocción por ebullición y la extrusión, ayudan a reducir o eliminar estos compuestos anti-nutricionales (Vega et al., 2023).

La extrusión ofrece la ventaja de producir alimentos con diversas texturas, formas, sabores y tamaños, siendo la harina una alternativa generada a partir de la extrusión. Esta harina puede ser utilizada como materia prima para la elaboración de otros productos alimenticios o como sustituto de otras harinas, como la de trigo, maíz, arroz, garbanzo, entre otras, para mejorar sus características nutricionales, debido a que es una fuente rica en proteínas, fibra y micronutrientes, su versatilidad puede ser beneficiosa para sustituir o complementar el uso de otras materias primas (Valencia y Montoya, 2021). Existen diferentes formas para la obtención de harinas, como la cocción tradicional, imbibición, germinación y extrusión, los cuales pueden producir cambios en sus propiedades nutrimentales, actividad fisiológica y tecno-funcional (Arqueroz, 2023).

Extrusión en la producción de harinas.

La extrusión es un proceso utilizado para la obtención de harinas, el cual proporciona varios beneficios a la matriz alimentaria como mejora en la digestibilidad y calidad nutricional, incremento en sus propiedades tecno-funcionales, mejora en la estabilidad del producto final y la diversificación de la oferta de productos alimenticios. Esto puede contribuir a una mayor aceptación y consumo de legumbres como parte de una dieta saludable y sostenible (Ávalos, 2020).

Debido a su composición nutrimental los cereales y las legumbres son alimentos de consumo habitual. Por lo cual se ha buscado la manera de diversificar su uso mediante el desarrollo de alimentos novedosos elaborados a base de harinas de legumbres y cereales extruidos, algunos ejemplos son:

- Harina de garbanzo: obtenida mediante la extrusión de garbanzo seco, ya sea crudo o cocido. Es una matriz alimentaria versátil y puede ser utilizada para la elaboración de panes, galletas, bocadillos y productos horneados.
- Harina de trigo: comúnmente molido para la obtención de harina, sin embargo, también se puede obtener mediante la extrusión, las cuales presentan propiedades diferentes a las obtenidas de manera convencional y puede ser utilizada en productos horneados y otros alimentos.
- Harina de arroz: obtenida por la extrusión de arroz seco para la producción de una harina suave y fina, puede ser utilizada para la elaboración de panes, galletas, pasteles y masas para empanizar.
- Harina de maíz: secado para la extrusión, puede ser utilizado para la elaboración de snacks, cereales para el desayuno y productos de panadería.
- Harina de lenteja: de manera similar, las lentejas secas pueden ser extruidas para la obtención de harina, destacando por su alto contenido de proteína y fibra, puede ser utilizada para la elaboración de panes, tortillas, galletas y pastas.

La extrusión en alimentos es una tecnología emergente, la cual permite procesar y producir una gran cantidad de alimentos de diferentes formas, textura y sabor. Permite la obtención de alimentos con mejoras nutricionales y funcionales en comparación con otros métodos

tradicionales, al evitar la degradación de los componentes, conservando así los nutrientes y sabores del alimento (Oblitas, 2017).

Durante el proceso de extrusión, existen parámetros generales y particulares los cuales pueden influir en el proceso y obtención del producto, estos son:

- Parámetros generales: la presión, la temperatura, diámetro de la boquilla y la velocidad del tornillo.
- Parámetros particulares: características particulares del material, las cuales a su vez pueden influir en la textura y color del producto, es decir el contenido de agua, estado físico y composición de sus nutrientes, es decir, el contenido de proteína, almidón y grasa.

Por otro lado, es indispensable que el funcionamiento del equipo sea estable, de esta manera se garantiza la obtención de un producto uniforme con las características deseadas, de lo contrario pueden generarse grandes cambios en el producto final. Por lo tanto, entre las variables más importantes a controlar son: humedad, contenido de grasa, flujo de alimentación, aditivos en la mezcla, modificador de pH o emulsificantes en formulación (Vega et al., 2023).

En el caso particular de la extrusión en lenteja, el tipo de variedad puede influir en las características de la harina obtenida. Aunque todas las variedades son ricas en proteína y fibra, el contenido puede cambiar dependiendo de la variedad de la que se trate, así mismo la temperatura y tiempo de extrusión pueden afectar la disponibilidad y concentración de las mismas. Por otro lado, la modificación en el sabor y color de las harinas extruidas de lenteja, puede cambiar dependiendo de la variedad que se trate, influyendo en su aceptabilidad en ciertos productos alimentarios. Así mismo, la textura en harinas de lenteja extruida puede modificarse, generando harinas con una textura más suave y fina dependiendo de la variedad que se trate. Finalmente, las propiedades tecno-funcionales como viscosidad, dureza índice de absorción y solubilidad de agua, pueden cambiar entre las distintas variedades de lentejas extruidas, lo que podría influir en su uso en aplicaciones alimentarias específicas (Montoya, 2023).

Las propiedades tecno-funcionales en harinas son importantes ya que determinan la idoneidad de una harina para diferentes aplicaciones alimentarias y cómo se comportará en diferentes procesos de producción.

Propiedades tecno-funcionales en harinas

Son propiedades fisicoquímicas las cuales brindan información sobre como una matriz alimentaria puede comportarse dependiendo su contenido e interacción entre proteínas, fibra, almidón, etc. Estas propiedades influyen en el comportamiento de una matriz alimentaria durante su implementación en el desarrollo de alimentos, ya que determinan su capacidad para ser utilizada. Algunos ejemplos de propiedades tecno-funcionales más comunes en harinas son: índice de absorción y solubilidad de agua, capacidad de retención de grasa y aceite, capacidad de formación de gel, viscosidad, elasticidad y capacidad de formación de espuma (Sánchez-Mendoza et al.,2017).

Las propiedades tecno-funcionales en harinas han adquirido una gran importancia en la actualidad debido a la implementación de harinas de legumbres para el desarrollo de alimentos. Las harinas de lenteja poseen propiedades tecno-funcionales útiles para su implementación en el ámbito culinario e industria alimentaria. Su alto contenido de proteína la convierte en una excelente opción para enriquecer alimentos con proteínas de origen vegetal. Su contenido significativo de fibra dietaria mejora la textura, viscosidad y capacidad de absorción de agua de la harina de lenteja, además tienen la capacidad de formar geles cuando se hidratan y se calientan, esto puede ser útil en la fabricación de productos alimenticios como salsas, sopas y rellenos (Torres-González et al., 2016).

El almidón presente en la lenteja está constituido por amilosa, amilopectina (polímero ramificado) y polisacáridos no ramificados (configuración helicoidal), el almidón en presencia de agua y temperatura puede cambiar su estructura y provocar un aumento en la viscosidad y textura, la cual se debe a la formación de un gel por la adhesión de unos granos a otros (Cabrera-Ramírez et al., 2022). La fibra dietaria es el residuo vegetal no digerible, constituida por polisacáridos no amiláceos y lignina, y se divide en dos fracciones: fibra soluble (FS), la cual tiene la capacidad de formar geles viscosos en el intestino delgado y promover la absorción

de glucosa y grasa. Por otro lado, la fracción insoluble (FI) actúa en el intestino grueso ayudando a mejorar la digestión. En el caso particular de la lenteja, la fracción de fibra con mayor presencia es la insoluble, la cual además de los beneficios fisiológicos que aporta, también está asociada con el sabor, textura y palatabilidad (Aguilera, 2009). Otro de los nutrientes mayoritarios en la lenteja es la proteína (15-35 %), la cual al aplicar un procesamiento térmico puede mejorar su digestibilidad, sin embargo, la aplicación de calor también puede mejorar o afectar las propiedades tecno-funcionales ya que da lugar a una mayor exposición de los grupos hidrofóbicos, cambiando su capacidad de gelificación, las propiedades reológicas de los geles, la capacidad espumante y emulsificante (Anuradha et al., 2017).

Evaluación de la calidad tecno-funcional.

Uno de los compuestos mayoritarios presentes en la lenteja son los carbohidratos (24-68 %), el almidón es el polisacárido mayoritario seguido de la fibra dietaria, los cuales al ser objeto de un procesamiento térmico pueden cambiar sus propiedades tecno-funcionales.

Las propiedades tecno-funcionales dependerán particularmente de la modificación que sufren tanto el almidón como las proteínas durante la cocción y molienda de las legumbres, estas propiedades tecno-funcionales pueden ser categorizadas con base en su interacción con el agua, interacciones inter-moleculares y su capacidad para interactuar con moléculas no-polares (Cabrera-Ramírez et al., 2022) reflejándose en parámetros como el índice de absorción de agua (ÍAA) e índice de solubilidad de agua (ISA), entre algunos otros parámetros, de ello dependerán sustancialmente las características que tengan las harinas para funcionar como tales (textura, rendimiento, humectación, etc.) (González et al., 2016). En este sentido las propiedades tecno-funcionales han cobrado relevancia, debido al incremento en el uso de harinas de legumbres para el desarrollo y formulación de alimentos, ya que existen distintos procesamientos para obtener las harinas pudiendo estos alterar sus propiedades tecno-funcionales.

Con referencia al ÍAA, este mide la cantidad de agua absorbida por los gránulos de almidón hinchados y/o embebidos en agua, está directamente relacionado con las propiedades de hidratación de la harina y puede ser utilizado como un índice de gelatinización, ya que valores

bajos indican una hidrólisis incompleta o baja gelatinización del almidón, mientras que valores altos están asociados con una descomposición o degradación del almidón (Mesas y Alegre, 2022). Por otro lado, el ISA, mide la cantidad de componentes solubles liberados del almidón después de la cocción, permitiendo verificar el grado de severidad del tratamiento térmico empleado, en función de la degradación, gelatinización, dextrinización y consecuente solubilización del almidón, por lo tanto, el ISA es un indicador *in vitro* de una buena digestibilidad del almidón (Olguín-Arteaga et al., 2015). La densidad aparente es una propiedad que ayuda a evaluar la modificación estructural que experimentan los gránulos de almidón al emplear algún tipo de tratamiento térmico, fermentación y germinación, por lo tanto, un aumento en esta propiedad se relaciona con la gelatinización del almidón. La capacidad de hinchamiento, es una propiedad que se ve afectada en mayor medida por tratamientos térmicos, al aumentar linealmente con el calor, por lo tanto, es posible observar un incremento en esta propiedad debido a la gelatinización del almidón. Por otro lado, el incremento de la capacidad de retención de agua y aceite estarán relacionados con la concentración y conformación de las proteínas (Cadena et al., 2023). En lo que refiere a la capacidad espumante, se ha observado una reducción en esta propiedad posterior a la aplicación de procesos térmicos, asociándose a una desnaturalización de las proteínas, principalmente en las concentraciones de albúmina y globulina. La capacidad espumante es una propiedad que suele disminuir significativamente cuando se utilizan procesos térmicos y deshidratación a altas temperaturas, esto se debe al daño provocado por la temperatura en las estructuras proteicas, afectando igualmente su solubilidad y propiedades emulsionantes. La capacidad de gelificación refleja un aumento al emplear tratamientos térmicos, debido al cambio que puede generarse en las estructuras de las proteínas y el almidón (Miranda et al., 2022).

Las legumbres en general exhiben propiedades tecno-funcionales diversas, las cuales a su vez se correlacionan con su contenido nutricional, este dependerá del tipo de legumbre y la variedad. En la actualidad existe un marcado interés por el desarrollo de productos y subproductos a base de legumbres como lenteja, haba, garbanzo, entre otros, ya que gracias a sus propiedades nutricionales y tecno-funcionales pueden ser útiles en panificación, elaboración de pastas, bebidas fermentadas, espesantes, entre otras opciones (Argel, 2022).

3.3 Objetivo

Evaluar la calidad tecno-funcional de harina de dos variedades de lenteja extruida y determinar la correlación entre las propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcionales de la harina de lenteja verde y roja extruidas.

3.4 Materiales y Métodos

Material biológico. A partir de las variedades de lenteja (*Lens culinars* M.) verde y roja (Apartado 1.4), se obtuvieron tres lotes de harina de lenteja: Lote 1 (Control 1) harina de lenteja cruda, Lote 2 (Control 2) harina de lenteja cocida y Lote 3 (Material de estudio) harina de lenteja extruida a 90 y 130 °C. Se determinó su calidad tecno-funcional a través de las siguientes variables de respuesta:

Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

Los índices de absorción de agua y solubilidad en agua se analizaron mediante el método descrito por (Anderson et al., 1969). Para el IAA se utilizó una muestra de 2.5 g de harina de lenteja y se suspendió en 30 ml de agua a 30 °C en un tubo de 50 ml para centrifuga, previamente tarado, se agitaron intermitentemente con ayuda de un vortex a 200 rpm por 30 min. La suspensión se centrifugó a 3020 rpm durante 10 min a 30°C utilizando una centrifuga marca international clinical, modelo CL. El líquido sobrenadante se decantó en un recipiente tarado para la determinación de sólidos por diferencia de peso. El gel formado se pesó, y el índice de absorción de agua se calculó con este peso, como gramos de gel por gramos de muestra seca. La evaluación se hizo con tres repeticiones.

El índice de solubilidad de agua se evaluó pesando los sólidos obtenidos después de evaporar en una estufa el sobrenadante de las muestras utilizadas en la determinación de índice de absorción de agua. Se expresó como el porcentaje de sólidos secos en 2.5 g de muestra. La evaluación se hizo con cuatro repeticiones.

$$ISA = \frac{PSS}{PMS} (100)$$

Donde:

PSS: peso sólidos secos.

PMS: peso muestra seca b.s (base seca).

$$IAA = \frac{PR}{PM - PE}$$

Donde:

PR: peso residuo o gel.

PM: peso muestra b.s. (base seca):

PE: peso sólidos secos.

Determinación de color en harina de lenteja

El color de las lentejas se determinó utilizando la metodología por colorimetría utilizando un colorímetro marca FRU®. La harina se colocó en una caja Petri de vidrio y se realizaron las lecturas en tres diferentes puntos de la muestra para obtener los valores de L (Luminosidad) y las coordenadas de color a y b. A partir de los valores de L, a y b se determinaron los atributos de color, ángulo de matiz (AM) e índice de saturación (IS). Los cálculos se llevaron a cabo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Índice de Saturación(IS)} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{Ángulo de Matiz(AM)} = \arctan \frac{b}{a}$$

Análisis del perfil de textura de las harinas de lenteja rehidratadas (masa).

Consistencia de la masa (harina de lenteja rehidratada).

La consistencia de las masas se determinó subjetivamente. Se tomaron 300 g de harina de lenteja (roja y verde), se colocaron en un contenedor de acero inoxidable, se hidrató con agua en proporciones 1:0.5, 1:1, 1:1.5 (harina:agua), y se evaluó la consistencia en función de la textura y uniformidad de la masa. Dependiendo de la consistencia de la masa se le asignó una

calificación de 1 a las masas que presentaron buena consistencia, 2 a las de consistencia regular y 3 a las de mala consistencia. Las determinaciones se hicieron mediante tres repeticiones.

Dureza, cohesión y adhesión

Para la determinación de estas propiedades se realizó un análisis de perfil de textura (APT) utilizando un texturómetro (Texture Analyzer model TA Plus., Loyd Instrument) con un software Nexygen plus. Se tomó una muestra de harina rehidratada en una proporción harina:agua de: 1:0.5 harina cruda y 1:1.5 para harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida (90 y 130 °C). Las muestras se moldearon en forma de cilindro circular con un diámetro de 16 mm y 22 mm de altura. Los parámetros de medición fueron: velocidad 2 mm/s y una compresión en dos ciclos al 70 %, utilizando un plato de compresión de 75 mm de acero inoxidable, registrando la fuerza máxima requerida en la primera compresión (dureza), la fuerza requerida para comprimir la muestra por segunda vez (cohesión) y la fuerza negativa de la primera compresión (adhesión), estos valores fueron reportados en Newton.

Imágenes por Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Se realizó un pre-tratamiento de las harinas crudas, cocidas por ebullición y extruidas (90 y 130 °C) el cual consistió en someter las muestras a una ultra-congelación y posterior liofilización. Las harinas se colocaron en tubos falcón y se almacenaron en una cámara de refrigeración hasta su uso. Para la obtención de las micrografías de las harinas objeto de estudio se utilizó un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo modelo Jeol JSM 7600F, se generaron imágenes en aumento a 250x, 500x, 1000x y 2500x.

Diseño y Análisis Estadístico.

Se utilizó un diseño factorial 2X4. Los Factores de estudio fueron: Factor 1 fue la variedad de lenteja con dos niveles (Verde y Roja) y el Factor 2 la temperatura del proceso de cocción con cuatro niveles (Control: 0, Hidrotérmico: 94°C) y (Extrusión: 90 y 130 °C). Se realizaron 3

repeticiones por tratamiento. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico JMP11 y comparados mediante un análisis de varianza de una vía, las medias fueron comparadas con una prueba de Tukey con un nivel de significancia $P \leq 0.05$.

Análisis de correlación. Se evaluó el grado de asociación lineal entre las variables de respuesta (proteína, FDT, FDS, FDI, polifenoles totales, ABTS⁺, DPPH^{*}, ISA, IAA, cohesión, adhesión y dureza), realizando un análisis del coeficiente de correlación de Pearson, cuyo valor se encuentra entre -1 y +1. Por lo cual, si una de las variables incrementa conforme la otra disminuye, la correlación será negativa. Inversamente, si dos variables incrementan al mismo, la correlación será positiva (Hernández et al., 2018).

3.5 Resultados y discusión

Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad de agua (ISA) de la harina de lenteja extruida.

El IAA mide la cantidad de agua absorbida por el almidón y puede ser utilizado como un índice de gelatinización, también está relacionado con la elasticidad y viscosidad de un alimento, por lo que un aumento en esta índice resulta favorable. Los resultados para el IAA presentados en la Tabla 8 indican que no hay una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) en el IAA entre el control 1 para ambas variedades (lenteja roja: 3.68 g de gel/g y lenteja verde 3.63 g de gel/g). Posterior al proceso de cocción por ebullición (Control 2), se observó un incremento significativo en la harina de lenteja verde 0.26 g de gel/g para el IAA (3.89 g de gel/g), en tanto que dicho índice en el control 2 de la variedad roja incrementó 0.41 g de gel/g (4.09 g de gel/g). En las harinas de lenteja extruidas de ambas variedades, el IAA es mayor al obtenido en los controles 1 y 2, encontrándose los mayores IAA a 130 °C (Extrusión a 90 °C: lenteja verde 4.68 g de gel/g, lenteja roja 4.76 g de gel/g. Extrusión a 130 °C: 5.26 g de gel/g para la variedad verde y 5.60 g de gel/g para la roja). El incremento en el IAA posterior a la cocción por ebullición (Control 2) y la extrusión, se asocia al efecto de gelatinización del almidón, al pasar de un material crudo a cocido al ser expuesto al calor y agua, incrementando el área de superficie al romper las estructuras cristalinas del almidón, lo que facilita la absorción de agua, mejorando así mismo su elasticidad y viscosidad de la matriz alimentaria (Urbina et al., 2023). El IAA obtenido para

ambas variedades de lenteja extruidas y sus controles, es superior al reportado por Aguilera (2009) para garbanzo, lenteja pinta y judía (2.10, 2.70 y 3.50 g de gel/g). Por otro lado, Contreras et al., (2017) reporto un IAA superior en harina de trigo (7.25 g de gel/g) destacando la capacidad de las proteínas (gluten) presentes para retener agua, ya que al interactuar con los almidones presentes forman redes estructurales capaces de retener agua, mejorando su elasticidad y viscosidad.

Tabla 8 Índice de absorción de agua e índice de solubilidad de agua en harina de lenteja extruida.

Harina	IAA (g de gel/g de muestra)	ISA (%)
Control 1 lenteja verde	3.63 + 0.07f	15.28 + 0.83b
Control 2 lenteja verde	3.89 + 0.04e	8.93 + 0.70c
Lenteja verde extruida a 90 °C	4.68 + 0.05c	13.98 + 0.07b
Lenteja verde extruida a 130 °C	5.26 + 0.06b	8.50 + 0.03c
Control 1 lenteja roja	3.68 + 0.07f	19.19 + 1.57a
Control 2 lenteja roja	4.09 + 0.06d	9.71 + 0.61c
Lenteja roja extruida a 90 °C	4.76 + 0.05c	14.86 + 0.06b
Lenteja roja extruida 130 °C	5.60 + 0.02a	9.15 + 0.07c

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca.

En lo que respecta al ISA puede utilizarse como un indicador de la degradación de compuestos moleculares y degradación del almidón, se relacionan con la cantidad de moléculas solubles en agua y está asociado a la dextrinización del almidón (Olguín-Arteaga et al., 2015). Los resultados del ISA presentados en la Tabla 13 indican que la harina de lenteja roja cruda (Control 1) tiene un ISA (19.19 %) mayor ($\alpha=0.05$) que la verde (Control 1) (15.28 %). La extrusión disminuye esta propiedad tecno-funcional presentándose los siguientes ISA para la harina de lenteja verde de 13.98 % a 90 °C y 8.50 % a 130 °C, mientras que la harina de lenteja roja presentó un valor de 14.86 y 9.71 % (90 y 130 °C). Es importante mencionar que conforme se incrementa la temperatura de extrusión, el valor del ISA disminuye proporcionalmente. Al comparar con el Control 2, la harina de lenteja verde cocida por efecto de la temperatura de ebullición presenta el menor valor del ISA (8.93 %) y en la harina de lenteja roja (Control 2) de 9.71 %, estos resultados con respecto al Control 1 y las harinas de lenteja extruidas. Con base en el análisis factorial, la variedad de lenteja, temperatura e interacción variedad*temperatura

“

influyen ($p < 0.001$, < 0.001 y 0.001) son factores que influyen significativamente en el IAA; contrariamente al ISA donde solo la temperatura influye ($p < 0.001$).

Los resultados mostrados son semejantes al promedio reportado por (Flores et al., 2016) para lenteja (13.18 %) e inferiores a los reportados para haba y garbanzo (24.02 y 27.97 %). Por otro lado, ambos autores (Aguilera, 2009) y (Flores et al., 2016), reportan que el proceso de cocción por lo general aumenta el IAA por la gelatinización del almidón, por tanto, el ISA suele bajar debido a la misma degradación del almidón. Esta información es consistente con los resultados mostrados anteriormente sobre el IAA, en tanto que el IAA incrementó en las harinas de lenteja extruidas y la harina de lenteja control 2, el ISA disminuyó proporcionalmente. De acuerdo con Olguín-Arteaga et al., (2015) un ISA elevado en harinas afecta negativamente la textura y estructura del producto final, así mismo puede influir en una pérdida de nutrientes solubles en agua durante el procesamiento.

Determinación de parámetros de color en harina de lenteja verde y roja extruidas

En la Tabla 9 se presentan los resultados correspondientes a luminosidad (L), índice de saturación (IS) y ángulo de matiz (AM) de las harinas de lenteja verde y roja extruidas, así como los controles 1 y 2 correspondientes. La harina de lenteja verde cruda (control 1) presenta un AM de 83.08° que indica una coloración café-verdosa, en tanto que la harina de lenteja roja (control 1) presenta una coloración roja-amarilla con un AM de 63.12° . Cuando el material de estudio es sometido al proceso de cocción por ebullición (control 2) el AM disminuye en la harina de lenteja verde (78.28°) y en la harina de lenteja roja aumenta (75.22°) manifestando tonalidades naranja-amarillo. En lo referente a la extrusión es importante destacar que en la harina de lenteja verde no hubo un cambio significativo en el AM a las dos temperaturas utilizadas (90 y 130°C), caso contrario ocurrido en la harina de la variedad roja donde se aprecia que el AM incrementa con respecto al control 1 y que este incremento es proporcional a la temperatura de extrusión utilizada.

Tabla 9 Determinación de color en harina de lenteja cruda, cocida por ebullición y extruida.

Harina	Índice de saturación (%)	Ángulo de Matiz (°)	Luminosidad (%)
Control 1 lenteja verde	15.48 ± 0.05d	83.08 ± 0.30a	83.58 ± 1.25ab
Control 2 lenteja verde	12.08 ± 0.04e	78.28 ± 0.02b	81.90 ± 0.87b
Lenteja verde extruida a 90 °C	21.21 ± 0.43c	85.03 ± 0.17a	74.70 ± 1.08e
Lenteja verde extruida a 130 °C	14.97 ± 1.4d	83.14 ± 1.77a	78.15 ± 1.05d
Control 1 lenteja roja	22.65 ± 0.02bc	63.12 ± 0.15e	86.70 ± 1.13a
Control 2 lenteja roja	22.16 ± 0.02c	75.22 ± 0.06c	81.84 ± 0.96bc
Lenteja roja extruida a 90 °C	31.05 ± 0.14a	67.39 ± 0.95d	83 + 23 ± 1.28ab
Lenteja roja extruida 130 °C	24.55 ± 1.3b	73.78 ± 1.2c	78.39 ± 1.05cd

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca.

Con respecto al IS (Tabla 9), la extrusión a 90°C incrementa significativamente este parámetro en la harina de ambas variedades de lenteja (variedad verde 21.21 % y variedad roja 31.05 %) con respecto al control 1 (variedad verde 15.48 % y variedad roja 22.65 %). Sin embargo, a 130 °C no se observó un cambio significativo. Si comparamos con el control 2 (harina de lenteja cocida por ebullición), el IS disminuyó a diferencia del comportamiento observado en la extrusión.

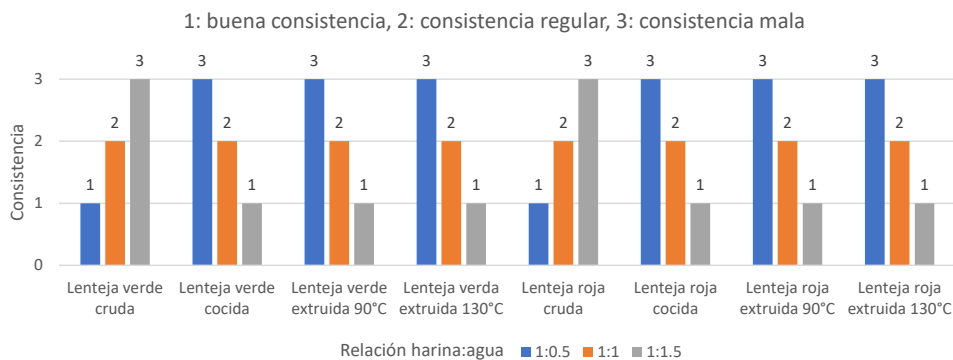
Finalmente, en la luminosidad, se aprecia que el proceso de extrusión tiene un mayor efecto sobre este parámetro de color, siendo significativo en harina de lenteja verde extruida a 90 °C y en harina de lenteja roja extruida a 130 °C, ambas con respecto al control 1. Comparativamente con el control 2, la cocción por ebullición de la lenteja disminuye la luminosidad en menor grado que cuando se aplica extrusión. Cabe resaltar que los valores de luminosidad van de 0 a 100, donde 0 es negro y 100 es blanco, por lo que mientras más cercanos son los valores a 100 las muestras analizadas son más luminosas (Rodríguez Rojas, 2024).

La magnitud en el cambio de color entre la harina cocida por ebullición y la extruida puede variar dependiendo de las condiciones utilizadas, afectando el contenido de polifenoles, luteína, carotenoides y antocianinas presentes en cada una de las harinas. La ebullición tiende a causar una pérdida de color y una disminución en la intensidad del color debido a la lixiviación de pigmentos y la degradación térmica, mientras que la extrusión puede resultar en cambios de color más complejos debido a posibles reacciones de pardeamiento y modificaciones estructurales inducidas por el calor y la presión (Cevallos et al., 2023).

Consistencia de la harina de lenteja verde y roja extruida

En el Gráfico 1 se presentan los valores obtenidos para la consistencia de las masas obtenidas tras la hidratación de cada una de las harinas de lenteja analizadas para las variedades verde y roja.

Gráfico 1. Consistencia de las harinas rehidratadas.



Escala de calificación: 1 consistencia buena, 2 consistencia regular y 3 mala consistencia.

Posterior a la hidratación de las harinas (1:0.5, 1:1 y 1:1.5), se formó una esfera con la masa obtenida, se presionó en el centro con el dedo pulgar e índice, si la masa mantenía su integridad era la adecuada, si se presentaban fisuras la consistencia no era óptima. Las harinas de lenteja de ambas variedades presentaron un comportamiento similar, en estado crudo (control 1) ambas variedades presentan consistencia buena en la proporción 1:0.5 y cuando la lenteja es llevada a un tratamiento térmico ya sea por cocción en ebullición (control 2) o por extrusión (90 y 130 °C) la consistencia buena se obtiene en la relación 1:1.5.

Dicho incremento en la hidratación de las harinas se asocia con el efecto generado por la temperatura ya que, durante la extrusión y cocción por ebullición el almidón presente gelatiniza, aumentando su capacidad de retener agua debido a la ruptura de las estructuras cristalinas (Aguilar-Valenzuela et al., 2011). Así mismo, las proteínas presentes se desnaturalizan, incrementado su absorción de agua. De igual manera se generan cambios en su estructura, facilitando la penetración del agua en la matriz alimentaria y permitiendo que más moléculas de

agua se adhieran (Miranda et al., 2022). Los resultados obtenidos se relacionan con el incremento en el IAA generados por los factores descritos previamente.

Perfil de textura (dureza, cohesión y adhesión) de las harinas de lenteja extruidas.

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en el perfil de textura (dureza, cohesión y adhesión) en harina de lenteja rehidratada verde y roja extruida. La dureza es la fuerza necesaria para conseguir en el alimento una deformación determinada (López-Espíndola et al., 2020). La masa obtenida a partir de harina de lenteja verde rehidratada (control 1) presentó una dureza de 22.76 N mayor a la de la variedad roja (17.19 N). Esta dureza disminuye en el control 2 (19.31 y 15.98 N verde y roja respectivamente). Sin embargo, en la extrusión se observa el efecto contrario, la dureza se incrementa en ambas variedades y es proporcional al incremento de la temperatura. Los resultados obtenidos presentan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) entre las variedades y tratamientos empleados. De acuerdo con el análisis factorial, la variedad de lenteja, la temperatura y su interacción (variedad*temperatura) influyen significativamente ($p=<0.001$, <0.001 y 0.001) sobre la dura de la matriz alimentaria.

Los valores obtenidos son superiores a los reportado por Gasca-Mancera y Casas-Alencáster (2017) para masa de maiz nixtamalizado (15.54 N). González et al., (2016) determinaron una dureza de 14.90 N para masa de semola de trigo- chayotextle (70-30 %). Por otro lado, Cevallos (2023) reporto una dureza de 10.87 N en harina de trigo, siendo inferior al obtenido. La dureza en la masa de trigo esta dada por la formación de redes entre el gluten y almidón, comparativamente con la masa de lenteja, al ser una legumbre lubre de gluten, las proteínas presentes interactuan con el alimidon y fibra conformando una matriz similar al gluten capaz de formar redes y conferir a la masa una dureza adecuada (González et al., 2016).

El aumento en la dureza de las harina de lenteja verde y roja rehidratadas posterior al proceso de extrusión es considerado favorable ya que facilita su manejo, conservando su forma y estructura durante el procesamiento, Por otro lado, el aumento en la dureza mejora la textura del producto final y reduce la perdida de volumen durante la cocción. Sin embargo, la dureza óptima de una masa dependera del tipo de producto que se desee elaborar (Cruz, 2021).

Tabla 10 Dureza, cohesión y adhesión en harina de lenteja rehidratada.

Harina	Dureza (N)	Cohesión (N)	Adhesión (N)
Control 1 lenteja verde	22.76 ± 0.83cd	0.241 ± 0.01a	5.73 ± 0.15a
Control 2 lenteja verde	19.31 ± 0.95ef	0.124 ± 0.03bc	2.48 ± 0.12cd
Lenteja verde extruida a 90 °C	27.72 ± 0.67b	0.137 ± 0.01bc	3.47 ± 0.47bc
Lenteja verde extruida a 130 °C	30.20 ± 1.29a	0.094 ± 0.02c	2.06 ± 0.56d
Control 1 lenteja roja	17.19 ± 0.33fg	0.252 ± 0.02a	5.89 ± 0.12a
Control 2 lenteja roja	15.98 ± 0.68g	0.153 ± 0.01b	4.36 ± 0.12b
Lenteja roja extruida a 90 °C	21.01 ± 1.05de	0.106 ± 0.01c	4.10 ± 0.70b
Lenteja roja extruida 130 °C	24.39 ± 0.82c	0.101 ± 0.02c	3.59 ± 0.55b

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar, en base seca.

La cohesividad es la fuerza que mantiene unidos los enlaces internos que existen entre las distintas partículas que integran una matriz alimentaria (López-Espíndola et al., 2020). La harina de lenteja verde (cruda) rehidratada presentó una cohesividad de 0.241 N, la cual disminuyó significativamente ($\alpha=0.05$) posterior al tratamiento de cocción por ebullición (0.124 N). La misma variedad tratada por extrusión a 90 °C y 130 °C presentó una cohesividad menor al control 1 (0.137 N y 0.094 N), sin embargo, no presenta diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) entre ambas temperaturas de extrusión y con la harina cocida por ebullición (control 2).

En cuanto a la harina de lenteja roja, el control 1 presentó una cohesividad de 0.252 N, la cual disminuyó significativamente ($\alpha=0.05$) posterior al tratamiento de cocción por ebullición (control 2) a 0.153 N. Observando el efecto de la extrusión sobre la harina de lenteja roja se obtuvo una cohesividad de 0.106 N a 90 °C y 0.101 N a 130 °C, mostrando diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) con respecto a sus controles 1 y 2. La disminución presentada en los valores de cohesión posterior a los tratamientos térmicos (control 2 y extrusión) hace referencia a una menor fuerza requerida para mantener unidas las moléculas de la matriz alimentaria. Así mismo los valores de cohesión son un indicativo de la suavidad/dureza que podría tener un alimento terminado, por lo que, a valores bajos de cohesión, la textura de un alimento terminado será mejor (Sánchez, 2014). Como puede apreciarse los factores que influyen significativamente en esta variable de respuesta fueron tanto la temperatura ($p<0.001$) como la interacción variedad*temperatura ($p<0.001$), mientras que la variedad no presenta diferencia significativa ($p=0.50$).

Los resultados obtenidos se asemejan a los reportados por Aparicio y Agudelo (2018) en masa de lenteja y sagú (0.12 N) y son inferiores a los reportados por Cruz (2008) en masas elaboradas con diferentes marcas comerciales de harina de trigo (0.312-0.551 N). La disminución de cohesividad en una masa se relaciona con el efecto generado en las interacciones moleculares entre las proteínas, almidón y fibra, debido a la desnaturalización y cambio estructural por efecto de la temperatura (Hernández-Hernández et al., 2023).

La adhesividad es el esfuerzo requerido para separar la superficie del alimento de otra superficie (Espinosa, 2021). En los resultados presentados en la Tabla 10 puede observarse que cuando se aplica un tratamiento térmico a la matriz alimentaria (harina de lenteja) la adhesividad disminuye significativamente ($\alpha=0.05$), esta disminución es mayor en la variedad verde que en la roja. Es importante mencionar que independientemente del tratamiento térmico, ya sea por extrusión o por cocción por ebullición (control 2) no hay diferencias significativas en la adhesividad de la matriz alimentaria analizada. La adhesividad entre las dos variedades analizadas es mayor en las harinas de lenteja roja que la verde, esto puede estar relacionado al mayor contenido de carbohidratos (almidón) en la variedad roja, así como la interacción con proteínas y fibra. Una adhesividad alta genera una masa viscosa lo cual dificulta su manejo. Como puede apreciarse en el análisis factorial, la variedad de lenteja, temperatura e interacción variedad*temperatura influyen en la adhesividad ($p=<0.001$, <0.001 y 0.003).

Los valores obtenidos se asemejan a los reportados por Aparicio y Agudelo (2018) en masa de trigo (4.46 N), segú y quinua (3.61 N) y lenteja y segú (3.73 N), por otro lado Gasca-Mancera y Casas-Alencáster (2017) reportaron valores inferiores en masa de maíz nixtamalizado (2.46 N).

La adhesión es una variable la cual puede influir en el índice de solubilidad de un alimento, ya que a mayor adhesión los compuestos solubles se liberan con mayor facilidad en el medio acuoso. De igual manera la cohesividad tiende a disminuir cuando el IAA y la consistencia de la masa aumentan, esto se debe a que una masa más cohesiva tiende a tener una menor capacidad de absorción de agua debido a que las partículas están más unidas, bajando su capacidad de retener agua (Arámbula-Villa et al., 2015).

“

Imágenes por microscopía electrónica de barrido (MEB) de las harinas de lenteja verde y roja extruidas.

En la Figura 3 se muestran las micrografías obtenidas a 500x de harina de lenteja extruida y los controles 1 y 2. En las muestras de harina de lenteja verde y roja cruda (control 1) se pueden apreciar gránulos de almidón con su forma representativa, siendo de una estructura exterior lisa y de formas ovoides y esféricas. Cuando la lenteja de ambas variedades se lleva a cocción por ebullición (control 2) los gránulos de almidón presentaron forma ovoide irregular, con una estructura externa con múltiples rugosidades, mayormente perceptibles en la variedad roja.

Harina de lenteja verde / Harina de lenteja roja

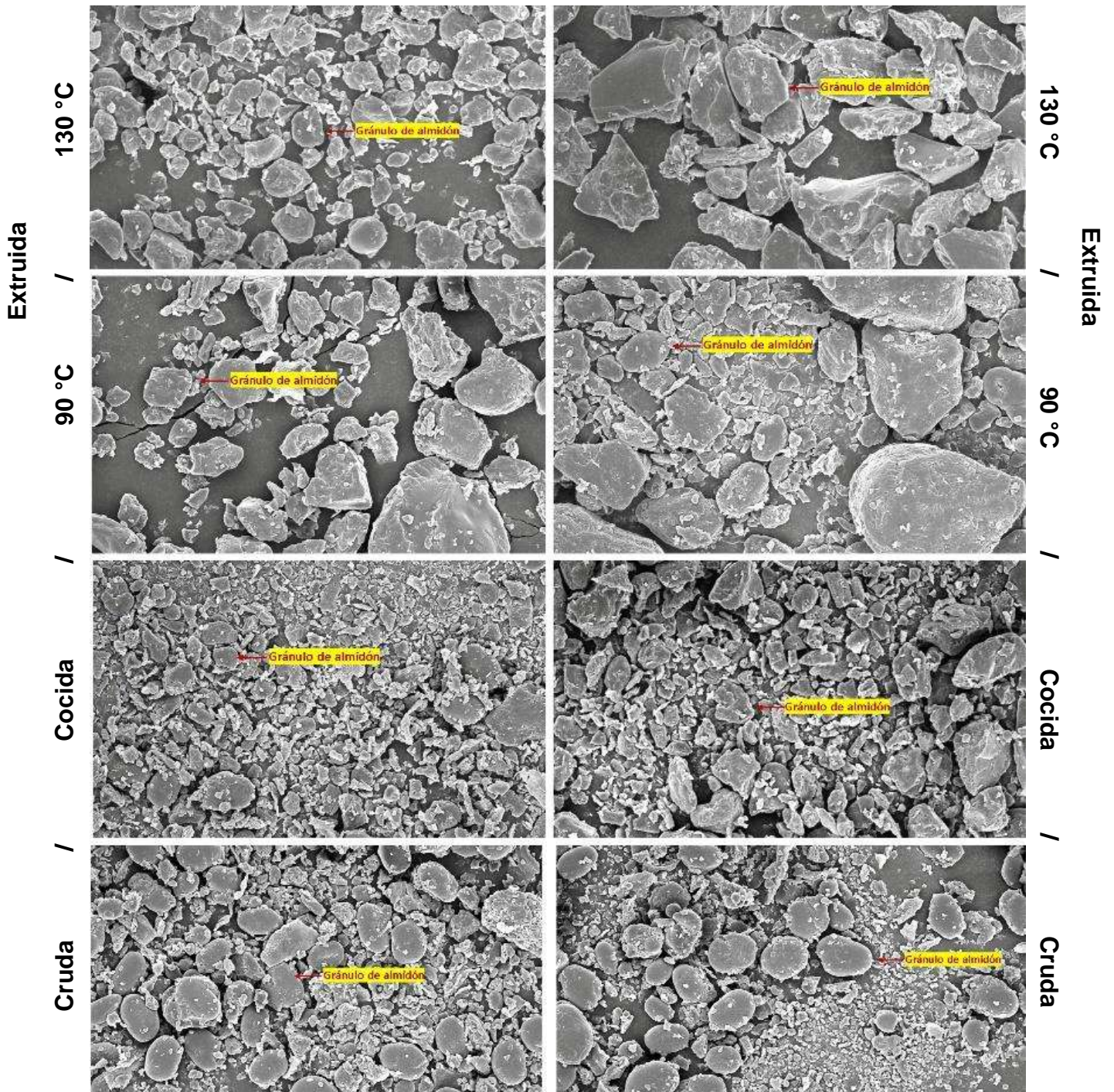


Figura 3 Micrografías a 500x de harina de lenteja extruida y los controles 1 y 2 (cruda y cocida por ebullición).

En cuanto al efecto de la extrusión a 90 y 130 °C sobre la harina de lenteja verde y roja es posible apreciar gránulos de almidón con una amplia gama de formas y tamaños, conservando

“ algunas estructuras ovoides irregulares. A una temperatura de extrusión de 90 °C, en la estructura externa de los gránulos de almidón es posible apreciar múltiples rugosidades y algunas fisuras, las cuales al incrementar la temperatura de extrusión a 130 °C son más evidentes. También es posible apreciar un incremento en el tamaño y la forma de los gránulos de almidón durante el proceso de extrusión y proporcional al incremento de la temperatura de extrusión, siendo más visible este efecto en la variedad roja. De acuerdo con Blanco (2017), el cambio presentado en el tamaño de los gránulos de almidón posterior al proceso de extrusión se debe a que, la amilosa sufre una lixiviación al romperse los gránulos de almidón (gelatinización) y durante el enfriamiento (retrogradación) experimentando una aglomeración. Las formas descritas presentadas concuerdan con las reportados por Zhen et al., (2011) siendo de textura lisa y de diferentes formas (ovoides, esféricas y algunos de ellos con forma de “bote”). Por otro lado, Blanco (2017) reportó que los gránulos de almidón de la lenteja oscilaban entre 3 y 30 μm de ancho y de 3 a 33 μm de largo.

En la Figura 4 se presentan en las micrografías de la harina de lenteja extruida y las controles 1 y 2, los cuerpos y matrices proteicas presentes.

Harina de lenteja verde / Harina de lenteja roja

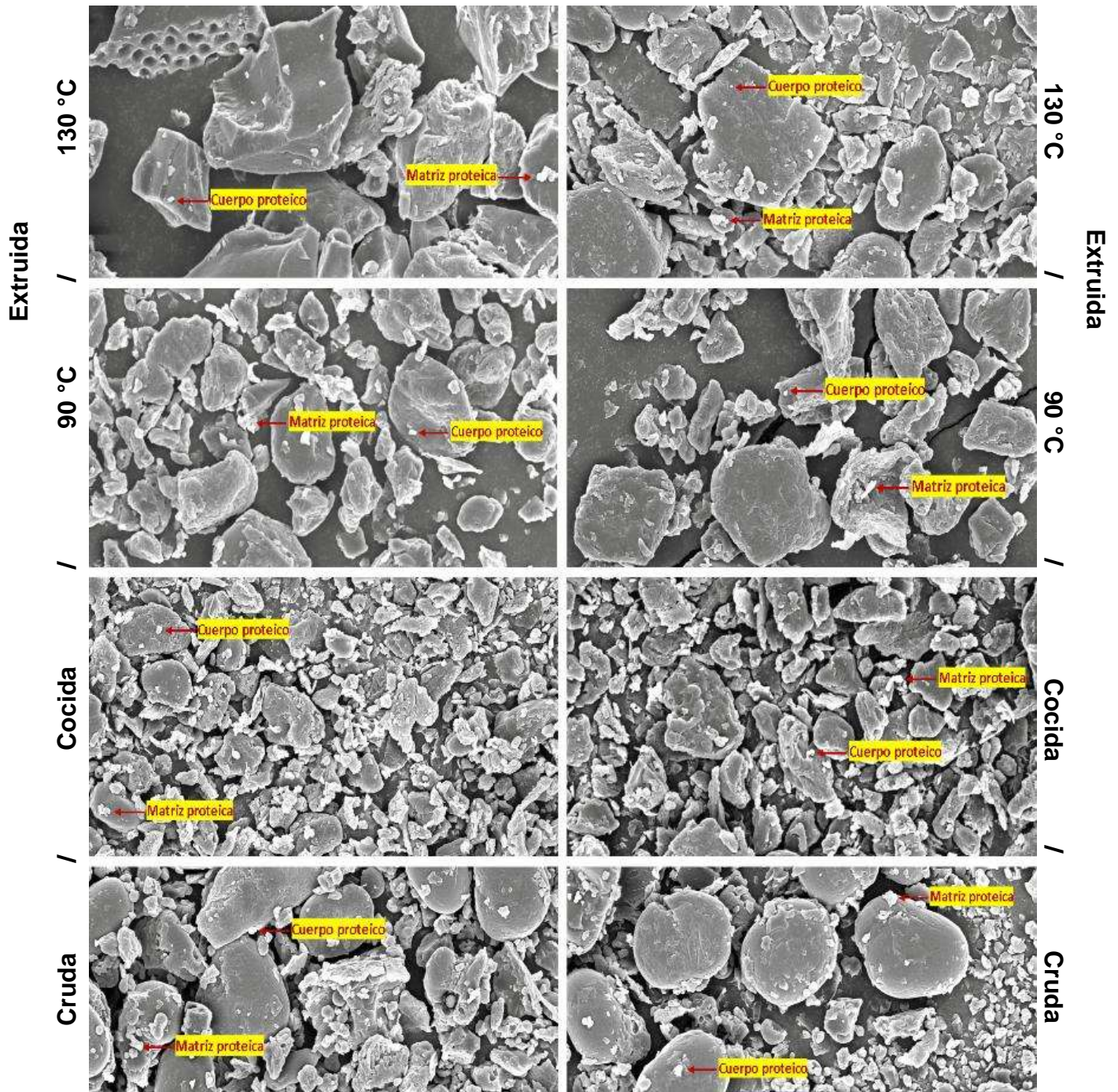


Figura 4 Micrografías de harina de lenteja verde y roja extruida y los controles 1 y 2 (cruda, cocida por ebullición).

Es posible observar partículas con forma globular o irregular unidas a los gránulos de almidón o entre los mismos, estas estructuras corresponden a las matrices o cuerpos proteicos disgregados durante la molienda de la harina, siendo más visibles en la harina de lenteja control

“

1 y 2 de ambas variedades. Por otro lado, en la harina de lenteja extruida de ambas variedades, es posible apreciar la formación de enlaces proteína-almidón, esta fusión se debe a la pérdida de solubilidad que las proteínas experimentan por efecto de la desnaturalización que resulta en la actuación de los grupos hidrofílicos tales como -OH, -NH₂, -COOH y -SH para formar enlaces cruzados con el almidón (Bravo, 2019).

Así mismo, en las micrografías obtenidas se evidencia un tamaño de partícula mayor en las harinas tratadas por extrusión en comparación a sus respectivos controles, este efecto es causado por la formación de complejos descritos previamente, aumentando la dureza de la matriz alimentaria durante estos procesos (Jiménez-Juárez et al., 2015)

Análisis de correlación

Harina de lenteja verde y roja cruda, cocida por ebullición y extruida (90 y 130 °C)

Las variables de respuesta muestran una correlación positiva entre ABTS⁺-Polifenoles totales (0.8387) y DPPH[•]-Polifenoles totales (0.761) lo cual indica que ambos parámetros son directamente proporcionales, a mayor concentración de polifenoles totales, la actividad antioxidante por ABTS⁺ y DPPH[•] incrementará y viceversa.

Así mismo, puede apreciarse una correlación positiva entre el índice de absorción de agua y fibra dietaria total, soluble e insoluble (0.7884, 0.8549 y .7378) por lo cual, al incrementar estos tres indicadores, se presentará un mayor índice de absorción de agua en la matriz alimentaria.

Tabla 11 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecnológicas en harina de lenteja verde y roja cruda, cocida por ebullición y extruida (90 y 130 °C).

	proteína (%)	FI	FS	FDT	PT	ABTS	DPPH	ISA	IAA	Cohesión (N)	Dureza (N)	Adhesión (N)
proteína (%)	1											
FI	-0.5643	1										
FS	-0.6529	0.9422	1									
FDT	-0.6027	0.9932	0.9749	1								
PT	0.7798	-0.6562	-0.7976	-0.7142	1							
ABTS	0.7619	-0.3388	-0.5459	-0.4155	0.8387	1						
DPPH	0.6393	-0.1042	-0.3623	-0.1955	0.761	0.9374	1					
ISA	0.7426	-0.6765	-0.7901	-0.7251	0.736	0.4715	0.3606	1				
IAA	-0.7565	0.7378	0.8549	0.7884	-0.839	-0.7669	-0.6775	-0.5841	1			
Cohesión (N)	0.4045	-0.4567	-0.5702	-0.5023	0.2896	0.4519	0.3581	0.2435	-0.7162	1		
Dureza (N)	-0.3546	0.8422	0.7257	0.8128	-0.3696	-0.2234	-0.0001	-0.2259	0.6867	-0.6396	1	
Adhesión (N)	0.4568	-0.8545	-0.8583	-0.8672	0.6557	0.2785	0.0886	0.8056	-0.5361	0.2332	-0.5017	1

Las variables adhesión y cohesión muestran una correlación negativa, inversamente proporcional con fibra dietaria total (-0.8672 y -0.5023), soluble (-0.8583 y -0.5702) e insoluble (-0.8545 y -0.4567), ya que mientras una variable aumenta, la otra disminuye. Por lo cual, la correlación negativa presentada sugiere que cuando hay un mayor contenido de FDT, FDI y FDS, menor será la adhesión y cohesión de la matriz alimentaria. Contrariamente a la variable dureza, donde existe una correlación positiva con FDT, FDI y FDS (0.8128, 0.8422 y 0.7257), lo cual sugiere que, a mayor contenido de FDT, FDS y FDI mayor será la dureza.

Finalmente, existe una correlación positiva entre el índice de solubilidad de agua y proteína (0.7426), esto puede estar relacionado con la conformación que adoptan las proteínas previo al ser sometidas a un proceso térmico (cocción por ebullición o extrusión).

Harina de lenteja verde extruida (90 y 130 °C)

En la Tabla 12 se presenta la matriz de correlación en harina de lenteja verde extruida (90 y 130 °C). Se aprecia una correlación positiva entre índice de absorción de agua y Fibra dietaria total, soluble e insoluble (0.8805, 0.8557 y 0.8629) esto indica que, el incremento en el índice de absorción de agua en la matriz alimentaria está asociado con el incremento de FDT, FDS y FDI. Por otro lado, existe una correlación positiva entre ABTS⁺-Polifenoles totales (0.9969) y DPPH[•]-Polifenoles totales (0.9943) por lo cual, a mayor concentración de polifenoles totales mayor actividad antioxidante por ABTS⁺ y DPPH[•].

Tabla 12 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcionales en harina de lenteja verde extruida (90 y 130 °C).

	proteína (%)	FI	FS	FDT	PT	ABTS	DPPH	ISA	IAA	Cohesión (N)	Dureza (N)	Adhesión (N)
proteína (%)	1											
FI	-0.9297	1										
FS	-0.9178	0.8971	1									
FDT	-0.9474	0.9895	0.9515	1								
PT	0.9691	-0.8977	-0.9216	-0.9263	1							
ABTS	0.9752	-0.9277	-0.9299	-0.9499	0.9969	1						
DPPH	0.958	-0.8583	-0.8834	-0.8864	0.9943	0.9863	1					
ISA	0.9748	-0.9067	-0.9184	-0.9316	0.9994	0.9981	0.9938	1				
IAA	-0.9288	0.8629	0.8557	0.8805	-0.9808	-0.9786	-0.9877	-0.9812	1			
Cohesión (N)	0.8559	-0.8702	-0.7351	-0.8461	0.9093	0.9187	0.9118	0.9147	-0.9496	1		
Dureza (N)	-0.8447	0.9114	0.914	0.9333	-0.8246	-0.8585	-0.7839	-0.8299	0.807	-0.7354	1	
Adhesión (N)	0.9537	-0.9492	-0.8179	-0.9283	0.9206	0.9413	0.9134	0.9328	-0.9235	0.928	-0.845	1

Así mismo, se presenta una correlación positiva entre proteína e índice de solubilidad de agua (0.9748) debido al cambio molecular que sufren las proteínas al cometerse a un proceso térmico. Por último, es posible observar una correlación positiva entre dureza con FDT, FDS y FDI (0.9333, 0.914 y 0.9114) esto debido a que, a mayor contenido de FDT, FDS y FDI mayor será la dureza. Efecto contrario al presentado en las variables cohesión y adhesión con fibra dietaria total (-0.8461 y -0.9283), soluble (-0.7351 y -0.8179) e insoluble (-0.8702 y -0.9492) debido a que, a mayor contenido de FDT, FDI y FDS, menor será la adhesión y cohesión de la matriz alimentaria.

Harina de lenteja roja extruida (90 y 130 °C)

Comparativamente con la variedad verde se observa una correlación positiva entre ABTS+ Polifenoles totales (0.9803) y DPPH+ Polifenoles totales (0.9819). Así mismo, existe una correlación positiva entre proteína e índice de solubilidad de agua (0.9978). La variable dureza se correlaciona positivamente con FDT, FDS y FDI (0.8317, 0.7596 y 0.7921) siendo menor a la presentada en harina de lenteja verde extruida (0.9333, 0.914 y 0.9114) debido a que, la harina de lenteja verde extruida presenta un mayor contenido de FDT, FDS y FDI en comparación a la variedad roja. Efecto contrario a lo presentado en las variables cohesión y adhesión con fibra dietaria total (-0.0643 y -0.301), soluble (-0.1966 y -0.3534) e insoluble (-0.0025 y -0.2503) debido a que, a mayor contenido de FDT, FDI y FDS, menor será la adhesión y cohesión de la matriz alimentaria, sin embargo, la correlación observada entre estas variables es menor a la presentada en la harina de lenteja verde extruida.

Tabla 13 Matriz de correlación entre propiedades nutricionales, actividad fisiológica y tecno-funcionales en harina de lenteja roja extruida (90 y 130 °C).

	proteína (%)	FI	FS	FDT	PT	ABTS	DPPH	ISA	IAA	Cohesión (N)	Dureza (N)	Adhesión (N)
proteína (%)	1											
FI	-0.9441	1										
FS	-0.8388	0.7308	1									
FDT	-0.969	0.9733	0.8679	1								
PT	0.996	-0.9376	-0.8482	-0.9674	1							
ABTS	0.9741	-0.8865	-0.765	-0.9022	0.9803	1						
DPPH	0.9857	-0.922	-0.8468	-0.9556	0.9819	0.9511	1					
ISA	0.9978	-0.9442	-0.8172	-0.9618	0.9972	0.9823	0.986	1				
IAA	-0.9901	0.9185	0.7931	0.9349	-0.9927	-0.9954	-0.9741	-0.9956	1			
Cohesión (N)	0.0932	-0.0025	-0.1966	-0.0643	0.1745	0.2144	0.1495	0.1376	-0.1781	1		
Dureza (N)	-0.8842	0.7921	0.7596	0.8317	-0.9186	-0.9424	-0.851	-0.8997	0.9233	-0.4598	1	
Adhesión (N)	0.3876	-0.2503	-0.3534	-0.301	0.4598	0.5475	0.3631	0.4249	-0.4866	0.8329	-0.7664	1

Por último, se observa una correlación positiva entre las variables FDT, FDI y FDS con índice de absorción de agua (0.9349, 0.7931 y 0.9185) ya que, a mayor contenido de estos tres indicadores, mayor capacidad de absorber agua tendrá la matriz alimentaria.

3.6 Conclusión

La extrusión a 130°C mostró mejoras significativas en las propiedades tecno-funcionales en comparación con 90°C y los controles correspondientes. Estos hallazgos sugieren que la variedad de la lenteja y la temperatura de extrusión son factores críticos que determinan la idoneidad de la harina de lenteja para diversos productos alimenticios. Se concluye que ambas variedades de harina de lenteja rehidratada (verde y roja) presentan un cambio debido a la temperatura utilizada durante el proceso y la variedad de lenteja. Entre estas propiedades las de mayor cambio son el IAA y el ISA, además de la cohesión, adhesión y dureza, los cuales guardan una relación estrecha con cambios en el almidón y las proteínas de la matriz alimentaria, dictando a su vez la capacidad que tienen los materiales para la formación de masa y su utilización en la elaboración de productos alimenticios. En cuanto al análisis de correlación se evidencia de manera general que, el cambio en las propiedades tecno-funcionales está asociado al contenido de proteína, fibra dietaria y sus fracciones, exhibiendo un cambio cuando la correlación se realiza por variedad de lenteja, siendo más evidente en las variables cohesión, adhesión y dureza con FDT, FDS y FDI.

3.7 Referencias bibliográficas

- Aguilar-Valenzuela, J., Esparza-Rivera, J., Meza-Velázquez, J., Candelas-Cadillo, M., Ahuilera-Ortiz, M., & Ramírez-Vaca, P. (2011). EFECTO DE LA HARINA DE LENTEJA (*Lens culinaris*) sobre las propiedades reológicas y de panificación de la harina de trigo. *Ciencia UAQ*, 4-10.
- Aguilera, Y. (2009). *Harinas de leguminosas deshidratadas: Características nutricionales y valoración de sus propiedades tecno-funcionales*. Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/101592/1/Harinas%20de%20leguminosas%20de%20shidratadas.pdf>

- Anderson, R., Conway, H., Pheiser, V., & Griffin, E. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 4-12.
- Anuradha, R., Pradhuman, Y., Lakshmi, K., Mishra, K., Aditya, J., & Pattanayak, A. (2017). Effect of dehulling, germination and cooking on nutrients, anti-nutrients, fatty acid composition and antioxidant properties in lentil (*Lens culinaris*). *Food Sci Technol* 54(4), 909–920. doi:DOI 10.1007/s13197-016-2351-4
- Aparicio, A., Salas-González, D., Lorenzo-Mora, A., & Bermejo, L. (21 de noviembre de 2022). *Rev Nutrición Hospitalaria*, 39(3), 7-3. doi:<https://dx.doi.org/10.20960/nh.04301>
- Argel, N. (2022). *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata*. doi:<https://doi.org/10.35537/10915/138278>
- Arqueroz, S. (15 de Marzo de 2023). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de Desarrollo de un snak extrusionado de harina de lenteja y maíz dirigido a la población con intolerancia al gluten: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42513/TFG-M-N2044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ávalos, L. (29 de Junio de 2020). *Desarrollo de una botana de tercera generación a base de leguminosas, obtenida mediante un proceso de extrusión*. Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9194>
- Ávalos, L. (29 de Junio de 2020). *TESIUAQ*. Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9194>
- Ayala, C. (2018). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(Especial La Paz), 54-59. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182018000300008&lng=es&tlng=es.
- Blasco, P. (2022). *Repositorio Institucional de Documentos Universidad de Zaragoza*. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/117775>
- Cabrera-Ramírez, A., M., G.-M., Gonzáles-Jasso, E., Ramírez-Jiménez, A., Velázquez, G., Villamiel, M., & Morales-Sánchez, E. (2022). Flours from popped grains: Physicochemical, thermal, rheological, and techno-functional properties. *Food Hydrocolloids*, 108-129.
- Cadena, F., Arias, J., García, A., Rodríguez, G., & Cuevas, D. (2023). Technofunctional characterization of wheat flours and X Triticosecale wittmack. *Revista Latinoamericana*

- De Ciencias Sociales Y Humanidades. Vol4(1), 3756–3767.
doi:<https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.524>
- Camacho-Hernández, I. L., Zazueta-Morales, J., Gallegos-Infante, J., Aguilar, E., Rocha-Guzmán, N., Jacobo-Valenzuela, N., & Gomez, C. (25 de Abril de 2014). Effect of extrusion conditions on physicochemical characteristics and anthocyanin content of blue corn third-generation snacks. *CyTA - Journal of Food*, 12(4), 10-15.
doi:DOI:10.1080/19476337.2013.861517
- Carballo, C. (2011). Soberanía alimentaria y producción de Alimentos en Argentina. En M. K. de Gorba, C. Carballo, M. Paiva, & V. Abajo, *Seguridad y Soberanía Alimentaria* (págs. 11-48). Buenos Aires: Buenos Aires: Colección Cuadernos.
- Carboni, A., Weisstaub, A., Ferrero, C., Puppo, M., & Zuleta, A. (Octubre de 2020). Application of lentil flour in healthy baked goods: Influence on calcium absorption and cecal pH. *Revista Jornadas de Investigación* -, 11(11). Obtenido de <http://repositorio.umaza.edu.ar/handle/00261/2563>
- Cárdenas, R. M., Ortiz, R., & Rodríguez, O. (2014). Agronomic behavior of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in Tapaste locality, Cuba. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 92-99. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193232493012.pdf>
- Chung-Wa, M., & Mengying, F. (2013). Optimization for the extraction of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* and their antioxidant and antiproliferative activities. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 886-894.
- Contreras, B. (24 de Abril de 2017). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21521>
- Cuj, M., Dardón, J., Mazariegos, M., Pérez, W., Fischer, E., & Román, A. (31 de Diciembre de 2017). *Revista Científica*, 27(1), 21-32.
doi:<https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v27i1.73>
- De Almeida Costa, G. E., Queiroz-Monici, K. d., Machado Reis, S. M., & Costa de Oliveira, A. (2006). Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food Chemistry*, 328-329.
- Delgado-Andrade, C., Olías, R., Jiménez-López, J., & Clemente, A. (6 de mayo de 2016). *Rev Arbor*, 192(779), a131. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2016.779n3003>

- Díaz, R., Silverio, C., Edison, O., & Criollo, J. (17 de Julio de 2018). Pruebas de cocción de pastas alimenticias elaboradas con harina de trigo - almidón de banano. *Revista Científica Cumbres*, 4(1), 63-73. doi:<https://doi.org/10.48190/cumbres.v4n1a6>
- Dueñas, M., Sarmiento, T., Aguilera, Y. B., Mollá, E., Esteban, R., & Martín-Cabrejas, M. (2016). Impact of cooking and germination on phenolic composition and dietary fibre fractions in dark beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and lentils (*Lens culinaris* L.). *Food Science and Technology*, 74.
- Flores, V., Chuck, C., De la Rosa, J., Orona, J., Rodríguez, W., & Salinas, A. (2016). Rendimiento de extracción de proteína y algunos análisis funcionales de concentrados y aislados de lenteja, haba y garbanzo producidos en una planta piloto. *Rev Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Vol1(2)*, 68-72. Obtenido de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/1/13.pdf>
- Flores, V., Chuck, C., De la Rosa, M., Orona, J., Rodríguez, W., & Salinas, A. (2016). Centro de Investigación y Desarrollo de Proteínas (CIDPRO). 1(2), 68-72 . Obtenido de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/1/13.pdf>
- Gasca-Mancera, J. C., & Casas-Alencáster, N. B. (2017). ADDITION OF NIXTAMALIZED CORN FLOUR TO FRESH NIXTAMALIZED CORN MASA. EFFECT ON THE TEXTURAL PROPERTIES OF MASA AND TORTILLA. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(3), 317-328. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62060311>
- Goicochea, R. (26 de Octubre de 2022). *Universidad Nacional de Huancavelica. Facultad de Ciencias Agrarias*. Obtenido de <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/unh/5771>
- Golzi, M., Marchetti, L., & Lorenzo, G. (27 de septiembre de 2023). Aprovechamiento y caracterización de agua de cocción de legumbres como fuente de biopolímeros en el desarrollo de matrices alimentarias con requerimientos tecnofuncionales específicos. *Rev Investigación Joven*, 10(3), 181–182. Obtenido de <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/15640>
- González, J., Morelo, K., Correa, D., & Morales, J. (2016). Efecto de la utilización de harina de *Lens culinaris* como extensor en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha. *Revista Tecnura*, 15-28.
- González, L., Romero, I., M. A., Cruz, J., Hernández, J., Soto, S., & Güemes, N. (2016). análisis de perfil de textura en masas de semola de trigo adicionadas con harina de chayotextle

- “
- (*Sechium edule*). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), 31-35. Obtenido de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/1/6.pdf>
- Hervert-Hernández, D. (21 de noviembre de 2022). *Rev Nutrición Hospitalaria*, 39(3), 52-55. doi:<https://dx.doi.org/10.20960/nh.04312>
- López, J. (Octubre de 2023). *Repositorio de la Universidad Autónoma de Sinaloa*. Obtenido de http://repositorio.uas.edu.mx/jspui/handle/DGB_UAS/406
- López-Muñoz, L., Vargas-Trujillo, N., Pachón-Gómez, J., & Osorio-Pedraza, A. (2020). Evaluación de la emulsión en una proteína vegetal a base de orellanas (*Pleurotus pulmonarius*) y lenteja (*Lens culinaris*). *SENNOVA*, 43-53.
- Lorzano, A. J., Ruiz, J. E., Sansón, D., Hernández, J., Sotelo, J. U., & Mireles, A. I. (2018). Evaluación de actividad antioxidante en germinados de lenteja (*Lens culinaris*) producidos bajo luz artificial en distintos rangos nanométricos. *Jóvenes en la ciencia Vol 4(1)*, 12-17. Obtenido de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2336>
- Luna Jiménez, A. (2006). Valor Nutritivo de la Proteína de Soya. *Rev Investigación y Ciencia*, 29-34.
- Melgar, A. (2023). *Repositorio Institucional Universidad San Ignacio de Loyola*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14005/13969>
- Mendoza, A. (27 de Julio de 2023). *Repositorio Dspace*. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/32039>
- Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2022). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y tecnología alimentaria Vol 3(5)*, 307-313. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/724/72430508.pdf>
- Minuzzi, A., Mora, F., Sedrez-Rangel, M. A., De Lucca-Braccini, A., & Scapin, C. A. (2007). Características Fisiológicas, Contenido de Aceite y Proteína en Genotipos de Soya, Evaluadas en Diferentes Sitios y Épocas de Cosecha, Brasil. *Agricultura Técnica (Chile)*, 353-361.
- Miranda, R., Domínguez, N., Giménez, M., Lobo, M., & Sammán, N. (2022). Technofunctionality of native and extruded Andean maize (*Zea Mays*) whole-grain flours. *Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LOTU)*. doi:<https://doi.org/10.26461/24.02>

- Molina, M., & Matín, Á. (Enero de 2017). *Elsevier*, 26(1), 70-77. Obtenido de <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-la-fibra-dietetica-procesada-como-13097333>
- Mollinedo, A., & Benavides, G. (2014). *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 41, 2133-2136. Obtenido de http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-37682014000200002&lng=es.
- Montoya, D. (1 de Noviembre de 2023). *Evaluación de compuestos antinutricios, propiedades tecno-funcionales y digestión in vitro de harinas de leguminosas extrudidas*. Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9972>
- Ñahuinlla, N. (14 de Septiembre de 2023). *Repositorio Institucional Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac*. Obtenido de <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1332>
- Oblitas, C. (2017). Tecnologías emergentes en la preservación de alimentos . *Caxamarca* 16(2), 151-161.
- Oblitas, J. (2017). *Revista Caxamarca*, 16(2), 151 – 161. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3108>
- Obregón, J., Bell, C., Estrada, A., Portillo J.J., & F.G. Ríos, F. (2012). Efecto de la cocción de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) de descarte en la respuesta productiva y rendimiento en canal de la codorniz japonesa en engorde (*Coturnix coturnix japonica*). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola Vol 46(2)*, 169-173. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193024447009>
- Olguín-Arteaga, G., Amador-Hernández, M., QuintanarGuzmán, A., Díaz-Sánchez, F., Sánchez-Ortega, I., Castañeda-Ovando, A., . . . Santos-López, E. (2015). Correlación de enatalpías de gelatinización con los índices de de absorción de agua y de sólidos solubles en agua de sémolas, granillos y harinas de maíz nixtamalizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química Vol 14(2)*, 303-310. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v14n2/v14n2a7.pdf>
- Rodríguez-Vidal, A., Martínez-FLores, H., González, J., Velazquez, G., Ramirez, A., & Morales, E. (12 de Octubre de 2016). Extruded snacks from whole wheat supplemented with

- textured soy flour: Effect on instrumental and sensory textural characteristics. *Journal of Texture Studies*, 48, 249-257. doi:<https://doi.org/10.1111/jtxs.12234>
- Sánchez-Mendoza, N., Ruiz-Ruiz, J., Dávila-Ortiz, G., & Jiménez-Martínez, C. (26 de Abril de 2017). *CyTA - Journal of Food*, 15(3), 400-408. doi:<https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1286522>
- Santos, L., & Martínez, M. (2023). *Repositorio Institucional UPV*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/194732>
- Sterna, V., Zute, S., & Brunava, L. (2016). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 8, 252-256. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.100>
- Torres-González, M., Jiménez-Munguía, M., & Bárcenas-Pozos, M. (2016). Harinas de frutas y/o leguminosas y su combinación con harina de trigo. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 94-102.
- Urbina-Dicao, K., Santacruz-Terán, S., Guapi-Álava, G., Revilla-Escobar, K., & Aldas-Morejon, J. (19 de Septiembre de 2023). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10(2), 33-41. doi:<https://doi.org/10.23850/24220582.5708>
- Valencia, L., & Montoya, A. (2021). *Harinas no convencionales con alto contenido proteico elaboradas a partir de legumbres y sus aplicaciones en la industria de alimentos : revisión bibliográfica*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10893/22081>
- Valls, J. (2003). *Efecto del procesamiento sobre el valor nutricional de los alimentos*. Caracas. Venezuela.: Departamento de Producción de Impresos de la Universidad Simón Bolívar. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10872/3198>
- Vega, C., Pérez-Bravo, F., & Mariotti-Celis, M. (2023). Amount, stability, and digestibility of carbohydrates after the extrusion process: Impact on the glycemic index of flours commonly consumed in Chile. *Rev Chil Nutr*, 50(2), 233-241. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182023000200233>.
- Vidal, M., Latorre, M., & Comas-Basté, O. (9 de Febrero de 2021). *Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2445/173889>
- Zhang, B., Deng, Z., Tang, Y., Chen, P., Ronghua, R., & Qiang, R. (2014). *Food Chemistry* 161, 296–304. Obtenido de www.elsevier.com/locate/foodchem

Perspectivas y/o Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos, la harina de lenteja verde y roja obtenida por extrusión muestra una mejora en sus propiedades nutrimentales a una temperatura de 90 °C, pero no en las propiedades tecno-funcionales, mientras que a 130 °C sus propiedades tecno-funcionales mejoran no así las nutrimentales. Por tanto, las harinas extruidas a 90 °C pueden ser utilizada como parte de una mezcla con otras harinas, como trigo, arroz, maíz, entre otras; para la elaboración de pan, galletas, pasteles u otros productos horneados, aportando un sabor diferente y alto contenido de proteínas. Contrariamente a la harina extruida a 130 °C, la cual puede ser utilizada para mejorar la textura, como empanizados, pastas, sopas, espesante para sopas y salsas, dando una mejor textura y sabor.

Del presente trabajo de investigación se derivan las siguientes perspectivas:

- Investigar el efecto de otras condiciones de extrusión que favorezcan obtener una matriz alimentaria de calidad en propiedades nutrimentales y tecno-funcionales.
- Es importante continuar con la determinación del contenido de compuestos anti-nutricionales de mayor interés, entre los que destacan: inhibidores de proteasas y amilasas, taninos, rafinosa, estaquiosa y verbascosa.
- En referencia a las propiedades tecno-funcionales, es recomendable determinar las fracciones del almidón resistente y no resistente para determinar su influencia y correlación.
- Evaluar la funcionalidad de las harinas obtenidas por extrusión en el desarrollo de productos alimenticios como panes, pastas, entre otros y determinar el grado de aceptación de las harinas obtenidas por extrusión.

Anexos

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos en la extracción proteica en harina de lenteja verde y roja extruida a diferentes temperaturas.

Tabla 14 Extracción proteica en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.

Temperatura de extrusión (°C)	Lenteja verde	Lenteja roja
	%	
90	18.84 + 0.49a	16.11 + 0.91a
100	13.86 + 0.41b	15.45 + 0.26a
110	12.95 + 1.57b	11.40 + 0.17b
120	7.75 + 0.50c	6.40 + 0.29c
130	6.88 + 0.49c	5.02 + 0.28c

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

Podemos observar que la harina de lenteja verde cocida por extrusión a 90 °C presenta el mayor porcentaje de proteína extraída (18.84 %), seguida de la lenteja extruida a 100 y 110 °C (13.86 % y 12.95 %) y lenteja extruida a 120 y 130 °C (7.75 % y 6.88 %), las cuales no presentan diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$). Con respecto a la harina de lenteja roja extruida a 90 y 100 °C presentaron el mayor porcentaje de proteína extraída (16.11 % y 15.45 %) y siendo estadísticamente distintos ($\alpha=0.05$) al porcentaje de proteína extraída a 110, 120 y 130 °C (11.40 %, 6.40 % y 5.02 %). Por otro lado, podemos apreciar que la harina de lenteja verde en comparación a la harina de lenteja roja presentó un mayor porcentaje de proteína extraída en cada una de las temperaturas empleadas durante el proceso de extrusión, así mismo al incrementar la temperatura de extrusión podemos observar una disminución en el porcentaje de proteína extraída en ambas variedades de harina de lenteja. De acuerdo con (Bala, Kinabo y Uebersax, 2022) la mayor parte de las proteínas experimentan una desnaturalización entre los 50 y 60 °C, la cual se puede verse reflejada en dicho contenido. En la Tabla 15 se observa el contenido de polifenoles totales en harina de lenteja variedad verde y roja extruida a diferentes temperaturas.

Tabla 15 Polifenoles totales en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.

Temperatura de extrusión (°C)	Lenteja verde	Lenteja roja
	mg AG/100g	
90	48.91 + 0.96a	44.13 + 0.66bc
100	45.91 + 0.84b	38.46 + 0.65d
110	42.13 + 0.88c	35.02 + 0.73ef
120	35.91 + 0.83e	32.35 + 0.76gh
130	33.36 + 0.09fg	30.35 + 0.47h

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

En cuanto a la harina de lenteja verde, el mayor contenido de polifenoles totales se presentó en la lenteja extruida a 90 °C (48.91 mg AG/100g) presentando diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) en comparación a la extruida a 100, 110, 120 y 130 °C (45.91, 42.13, 35.91 y 33.36 mg AG/100g). En la harina de lenteja roja, se presentó el mismo efecto, donde el mayor contenido de polifenoles se observa en la lenteja extruida a 90 °C con 44.13 mg AG/100g, en comparación a la extruida a 100, 110, 120 y 130 °C (38.46, 35.02, 32.35 y 30.35 mg AG/100g) presentó diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$).

De acuerdo con (Gutiérrez et al., 2019) los métodos de cocción doméstica afectan o modifican el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante hasta en un 40 %, dependiendo de la temperatura y tiempo que se utilice.

En la Tabla 16 se presentan los resultados referentes al índice de absorción de agua (ÍAA) en harina de lenteja verde y roja extruida a diferentes temperaturas.

Tabla 16 Índice de absorción de agua en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.

Temperatura de extrusión (°C)	Lenteja verde	Lenteja roja
	g de gel/g de muestra	
90	4.76 + 0.05d	4.68 + 0.05b
100	4.87 + 0.01cb	4.74 + 0.03b
110	4.93 + 0.02c	5.00 + 0.09ab
120	5.06 + 0.06b	5.15 + 0.54ab
130	5.26 + 0.06a	5.60 + 0.01a

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

Los valores obtenidos muestran una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.05$) por el incremento de la temperatura empleada durante el proceso de extrusión, en este sentido se observa que, en la harina de lenteja verde el ÍAA aumenta de 4.76 g de gel/g de muestra a una temperatura de 90 °C hasta 5.26 g de gel/g de muestra a 130 °C. La harina de lenteja roja presentó el mismo comportamiento, existencia solo diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$) entre la lenteja roja extruida a 90 °C (4.68 g de gel/g) y 130 °C (5.60 g de gel/g).

Dicho incremento se debe a que, los gránulos de almidón pierdan su estructura y absorban más agua, por lo cual puede usarse como índice de gelatinización. De acuerdo con Hernández–Nava et al., (2011) durante la extrusión, el porcentaje de humedad es un factor el cual aumenta el ÍAA al permitir un calentamiento uniforme en la matriz alimentaria, lo cual promueve una mayor gelatinización del almidón.

Los resultados obtenidos para índice de solubilidad de agua (ÍSA) en harina de lenteja verde y roja extruida a diferentes temperaturas se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17 Índice de solubilidad de agua en harina de lenteja verde y roja extruida a diferente temperatura.

Temperatura de extrusión (°C)	Lenteja verde	Lenteja roja
	%	
90	13.98 + 0.07a	14.86 + 0.06a
100	12.39 + 0.30b	13.61 + 0.15b
110	10.18 + 0.02c	11.87 + 0.10c
120	9.63 + 0.29d	10.42 + 0.09d
130	8.50 + 0.003e	9.15 + 0.07e

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). \pm = desviación estándar.

Los valores de ÍSA, al igual que la respuesta anterior, mostraron diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$), notándose una disminución a medida que se incrementaba la temperatura de extrusión. Por lo tanto, el valor más bajo fue de 8.50 % a una temperatura 130 °C, mientras que a 90 °C se presentó un ÍSA de 13.98 %. Por otro lado, la harina de lenteja roja presentó el mismo comportamiento, siendo de 9.15 % a 130 °C su valor más bajo y 14.86

“

% a una temperatura de 90 °C, mostrando una diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$) entre cada una de las temperaturas empleadas durante el proceso de extrusión.

El ÍSA está relacionado con la cantidad de moléculas solubles en agua y está asociado a la dextrinización, que es la degradación del almidón resultante de la cocción por extrusión (Flores et al., 2016).