

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



T E S I S

**COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS
DE TOSTADO Y GRANULOMETRÍA EN EL CONTENIDO DEL AGUA DE
MONOCAPA.**

Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por la Bachiller:
ROSSMERY JACQUELIN MINCHÁN DILAS

Asesor:
Ing. Mtr. MAX EDWIN SANGAY TERRONES

CAJAMARCA - PERÚ


2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Rossmery Jacquelin Minchán Dilas
DNI: N° 46776835
Escuela Profesional/Unidad UNC:
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
2. Asesor:
Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
Ing. Mtr. Willian Minchán Quispe
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS DE TOSTADO Y GRANULOMETRÍA, EN EL CONTENIDO DEL AGUA DE MONOCAPA.
6. Fecha de evaluación: 22/01/2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 24%
9. Código Documento: oid: 3117:548299816
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 22/01/2026

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*


Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
DNI: 10492305

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los siete días del mes de octubre del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente 2H - 204 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 419-2025-FCA-UNC, de fecha 22 de julio del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: **"COMPORTAMIENTO DE LINAZA (*Linum usitatissimum*) A DIFERENTES TIEMPOS DE TOSTADO Y GRANULOMETRÍA, EN EL CONTENIDO DEL AGUA DE MONOCAPA"**, realizada por la Bachiller **ROSSMERY JACQUELIN MINCHÁN DILAS** para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las diez horas y cinco minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las once horas y quince minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Ing. M. Sc. Fanny Lucila Rimarachín Chávez
PRESIDENTE

Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
SECRETARIO

Dr. José Gerardo Salhuana Granados
VOCAL

Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
ASESOR

Ing. Mtr. William Minchán Quispe
ASESOR

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios, por ser mi guía constante, por permitirme disfrutar cada etapa de este proceso, por darme fortaleza en los momentos difíciles, por no dejarme rendirme. Sin su presencia nada sería posible.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, en cada etapa de esta travesía, por sus palabras de aliento que me permitieron continuar hasta lograrlo.

A mí, por tomar la dedición de empezar y terminar esta investigación y a pesar de las barreras y miedos, no dejarlo inconcluso y lograr el objetivo trazado.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por haberme dado la vida, la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para llegar hasta este momento. En los momentos más difíciles, su presencia fue mi refugio y su guía me sostuvo.

A mis padres, gracias por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante a lo largo de toda mi vida. Su ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y perseverancia ha sido una inspiración permanente en este camino.

A mi hermano y hermanas, por su cariño, compañía y palabras de aliento en los momentos en los que más lo necesité. Su apoyo ha sido fundamental, y su confianza en mí me ha motivado a seguir adelante.

A mi supervisor, gracias por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente, por su comprensión, apoyo y por creer en mis capacidades. Su guía y confianza me permitieron compaginar el trabajo con mis estudios, lo cual fue clave para culminar esta etapa.

A mi compañera de tesis y amiga Dany Elizabeth Sánchez, por su compañía y apoyo desde el inicio hasta el final de esta investigación.

A mi asesor, el Ing. Msc. Max Edwin Sangay Terrones, por su paciencia y apoyo incondicional durante todo el proceso de realización de esta investigación, por compartir sus conocimientos y hacer posible este estudio.

El agradecimiento merecido al INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO, INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO EN CIENCIA, INGENIERIA Y TECNOLOGÍA “IIDIECIT”; por apoyar con la investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACION Y Problema DE INVESTIGACIÓN	2
2.1. Justificación de la Investigación.....	2
2.2. Problema de Investigación	3
2.3. Formulación del problema	4
III. OBJETIVOS	5
3.1. Objetivo general.....	5
3.1.1 Objetivos específicos.....	5
IV. HIPÓTESIS.....	6
V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
5.1. Antecedentes de la Investigación	7
5.2. Bases teóricas	10
5.3. Definición de términos.....	21

VI.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
VIII.	CONCLUSIONES	56
IX.	RECOMEDACIONES	57
X.	BIBLIOGRAFIA.....	58
XI.	ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición química proximal de la semilla de la linaza por cada 100 g	11
Tabla 2	Arreglo de los tratamientos	27
Tabla 3	Humedades relativas a diferentes soluciones de sales preparadas	32
Tabla 4	Parámetros de los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras	44
Tabla 5	Parámetros de los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras	46
Tabla 6	Parámetros de los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras	48
Tabla 7	Análisis de varianza para el valor de monocapa GAB de la harina de linaza en función de la granulometría y tiempo de tostado.	50
Tabla 8	Análisis de varianza para el valor de monocapa BET de la harina de linaza en función de la granulometría y tiempo de tostado.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas típicas de las isothermas de adsorción y desorción de los alimentos	17
Figura 2. Tipos de isothermas de adsorción y desorción de los alimentos	18
Figura 3. Ubicación de laboratorio Universidad Nacional de Cajamarca.....	24
Figura 4. Oreado de la semilla de linaza	29
Figura 5. Tostado de la semilla de linaza	30
Figura 6. Diagrama de flujo para la obtención de harina de linaza.....	31
Figura 7. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y por los modelos matemáticos de GAB y de BET. 37	
Figura 8. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y modelos GAB y BET	40
Figura 9. Isotherma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB	42
Figura 10. Diagrama de Pareto para el valor de monocapa GAB	51
Figura 11. Efectos principales para el valor de monocapa de GAB.....	52
Figura 12. Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de BET	54
Figura 13. Efectos principales para el valor de monocapa de BET	55

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos experimentale	65
Anexo 2. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras	66
Anexo 3. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras	66
Anexo 4. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H ₂ O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras	67
Anexo 5. Panel fotográfico.....	67
Anexo 6. Pasos en statistica para obtener el valor monocapa	68

RESUMEN

Esta investigación se desarrolló en la Universidad Nacional de Cajamarca, el objetivo perseguido fue evaluar la influencia del tiempo de tostado y la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de la linaza determinado por el modelo de GAB y de BET. Se obtuvo la harina de los granos de linaza de la variedad marrón obtenida del Mercado Central de la ciudad de Cajamarca. Como metodología se ha estimado 3 tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos), después de la molienda, la harina obtenida fue tamizada, con la finalidad de obtener harina con diferente granulometría (125, 250 y 500 micras), haciendo un total de 9 tratamientos. Para determinar la actividad de agua y elaborar las isothermas se utilizó sales saturadas con actividades de agua comprendidas entre 0.1 a 0.9, las muestras fueron evaluadas con 2 días de frecuencia durante 30 días; una vez logrado el equilibrio de la humedad se procedió con la construcción de las isothermas posteriormente fueron modeladas mediante los modelos matemáticos de GAB y de BET para obtener el valor de monocapa. Los resultados mostraron que el valor de monocapa GAB fue influenciado por la granulometría ($p < 0.05$) mostrando una relación indirecta, pues de, 0.0324 (g H₂O /g sólido) de 125 micras disminuyó a 0.0174 (g H₂O /g sólido) 500 micras. Mientras que el valor de monocapa de BET se vio influenciado por el tiempo de tostado ($p < 0.05$) aumentado el valor a medida que el tiempo de tostado se incrementa, pues de 0.0046 (g H₂O /g sólido) a 5 minutos aumentó a 0.0072(g H₂O /g sólido) a 15 minutos. Estos hallazgos demuestran que el tiempo de tostado y la granulometría en harina de linaza influyen en el valor de monocapa y se resalta la importancia de considerar estos factores a la hora de diseñar el proceso de tostado y almacenamiento para prolongar su vida útil. Además, se encontró que las isothermas típicas de la harina de linaza presentaron configuración de tipo II en la clasificación de Brunauer.

Palabras clave: harina de linaza, granulometría, tiempo de tostado, contenido de monocapa, modelos matemáticos de GAB y de BET, isothermas.

ABSTRACT

This research was conducted at the National University of Cajamarca. Its objective was to evaluate the influence of roasting time and particle size on the water content of single-layer flaxseed flour, determined by the GAB and BET models. The flour was obtained from brown Flaxseed grains purchased at the Central Market in the city of Cajamarca. As a methodology, we estimated three roasting time (5, 10, and 15 minutes. After grinding, the flour was sieved to obtain different particle sizes (125, 250, and 500 μm), for a total of nine treatments. To determine water activity and develop isotherms, saturated salts with water activities ranging from 0.1 to 0.9 were used. The samples were evaluated every two days for a period of 30 days. One moisture equilibrium was achieved, the isotherms were constructed and subsequently modeled using the GAB and BET mathematical models to obtain the monolayer value.

The results showed that the GAB monolayer value was influenced by particle size ($p < 0.05$), showing an indirect relationship: as it decreased from 0.0324 (g H_2O /g solid) at 125 μm , to 0.0174 (g H_2O /g solid) at 500 μm . Meanwhile, the BET monolayer value was influenced by the roasting time ($p < 0.05$), increasing as the roasting increased, from 0.0046 at 5 minutes to 0.0072 at 15 minutes. These findings demonstrate that roasting time and particle size in flaxseed meal influence the monolayer value and highlight the importance of considering these factors when designing the roasting and storage process to extend shelf life. In addition, it was found that the typical isotherms of flaxseed meal presented a type II configuration in the Brunauer's classification.

Keywords: flaxseed flour, particle size, roasting time, monolayer content, GAB and BET mathematical models, isotherms.

I. INTRODUCCIÓN

La linaza (*Linum usitatissimum*) es reconocida como una fuente valiosa de nutrientes y compuestos bioactivos, que van desde ácidos grasos omega-3 hasta lignanos con propiedades antioxidantes y fitoestrógenos. Su versatilidad y beneficios para la salud han llevado a un interés creciente en su aplicación en la industria alimentaria y la nutrición humana (Ostojich y Sangronis, 2012). En este contexto, el proceso de tostado y la granulometría de la linaza emergen como factores críticos que pueden influir en sus propiedades físicas y químicas, tal es el caso del valor de monocapa.

El tostado se ha destacado como un método eficaz para mejorar la palatabilidad y prolongar la vida útil de diversos alimentos, especialmente en harinas, al tiempo que puede tener impactos significativos en su composición y características (Lares et al., 2012). La granulometría, o el tamaño de partícula, también es un aspecto esencial en la formulación de productos alimentarios como las harinas, ya que puede afectar la textura, la absorción de agua y la capacidad de retención de líquidos de estos alimentos cuando el tamaño de partícula es menor se genera mayor área superficial, esto contribuye a la activación de más sitios de adsorción lo que podría resultar en un mayor valor de monocapa (Edel y Rosell, 2007).

El objetivo central de esta investigación fue determinar la influencia del tiempo de tostado y la granulometría en el contenido de monocapa de la harina de linaza. El contenido de agua de monocapa se refiere a la cantidad máxima de agua que un material puede retener en una sola capa alrededor de sus partículas, lo que tiene implicaciones cruciales en su aplicabilidad en diversas industrias.

II. JUSTIFICACION Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Justificación de la Investigación

La linaza (*Linum usitatissimum*) ha sido reconocida por sus propiedades nutricionales y beneficios para la salud, debido a su contenido de ácidos grasos omega-3, lignanos y fibra dietética, es por ello que la finalidad de evaluar los parámetros de tostado y el valor de monocapa de la harina de linaza en este estudio, es aportar un fin tecnológico; poder utilizar este tipo de harina en diversos tipos de industrialización, como pastelería y/o panadería, además de ser una materia prima que se encuentra disponible en nuestra región. Sin embargo, el proceso de tostado y la granulometría son aspectos que pueden modificar significativamente las propiedades físicas y químicas de la linaza. La literatura científica sugiere que el tostado puede influir en la estabilidad de los lípidos, el perfil de sabor y la actividad antioxidante de la linaza (Edel y Rosell, 2007; Ostojich y Sangronis, 2012). La granulometría, por otro lado, juega un papel crucial en las propiedades físicas y funcionales de los ingredientes alimentarios ya que ha sido reconocida por su impacto en sus propiedades reológicas y su capacidad de retención de agua. En el caso de la linaza, el tamaño de partícula puede afectar directamente su capacidad de retención de agua y, en consecuencia, su aplicabilidad tecnológica en el desarrollo de productos alimenticios. Comprender la interacción entre las condiciones de tostado y la granulometría resulta esencial para establecer estrategias de procesamiento que optimicen las propiedades nutricionales y funcionales de la linaza en alimentos formulados.

Desde una perspectiva tecnológica, el análisis del efecto del tiempo de tostado y de la granulometría sobre la retención de agua de monocapa aporta información relevante para el diseño de productos, en especial en aplicaciones de panificación donde este parámetro impacta la textura, las características sensoriales y la vida útil. Además, los resultados de

esta investigación ofrecen directrices aplicables a la producción a escala industrial, permitiendo a los fabricantes ajustar las variables de procesamiento con el fin de maximizar el desempeño funcional y aprovechar los beneficios nutricionales y saludables de la linaza en productos de valor agregado.

2.2. Problema de Investigación

El problema abordado en esta tesis se centra en comprender el comportamiento de la linaza (*Linum usitatissimum*) en respuesta a diferentes tiempos de tostado y variaciones en la granulometría, específicamente en relación con el contenido de agua de monocapa. La linaza, ampliamente reconocida por sus propiedades nutricionales y su potencial en la industria alimentaria, experimenta cambios significativos durante el proceso de tostado (Figuerola et al., 2008). Aunque existen estudios sobre las transformaciones generales de la linaza durante el tostado, la interacción específica entre el contenido de agua de monocapa, los tiempos de tostado y la granulometría requiere una investigación más detallada y especializada.

La variación en la granulometría de la linaza, es decir, el tamaño de partícula resultante del proceso de molienda es un factor crucial que puede afectar sus propiedades físicas y funcionales (Puma, 2017). Además, el contenido de agua de monocapa, que refleja la máxima cantidad de agua que puede ser retenida por una sola capa alrededor de las partículas de linaza, es esencial para comprender su capacidad de retención de agua y su comportamiento en aplicaciones alimentarias y procesos de formulación.

El problema se presenta en la necesidad de llenar el vacío en la comprensión científica de cómo diferentes condiciones de tostado y variaciones en la granulometría influyen en el contenido de agua de monocapa de la linaza. Esta información es muy importante para la optimización de procesos industriales y la formulación de productos alimentarios en los que la linaza desempeña un papel significativo. Además, esta investigación contribuirá a la

comprensión de los cambios físicos y químicos que experimenta la linaza durante el tostado y cómo estos cambios se ven influidos por la granulometría.

2.3. Formulación del problema

¿Cuál es la influencia del tiempo de tostado y granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza (*Linum usitatissimum*)?

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar la influencia del tiempo de tostado y la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina linaza *Linum usitatissimum*.

3.1.1 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de diferentes tiempos de tostado en el contenido de agua de monocapa en la harina de linaza
- Determinar la influencia de la granulometría en el contenido de agua de monocapa de la harina de linaza.
- Caracterizar las isotermas de sorción de humedad experimentales y modeladas de la harina de linaza.

IV. HIPÓTESIS

El proceso de tostado y la variación en la granulometría de la harina influirá significativamente en el valor de monocapa, cuando mayor sea el tiempo de tostado y el tamaño de partícula, menor será el valor de monocapa de la harina de linaza.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5.1. Antecedentes de la Investigación

Fukui et al. (2022) estudiaron la estabilidad de almacenamiento y la idoneidad de procesamiento en polvo de arroz integral tostado para seleccionar la mejor condición de tostado para el desarrollo de nuevos productos de arroz integral tostado. Prepararon polvos de arroz integral tostado con diferentes niveles de tostado crudo, tostado claro, tostado medio y tostado oscuro, y analizaron el color, degradabilidad (contenido de humedad, actividad del agua e índice de acidez) del polvo de arroz tostado. Y observaron un valor L^* más bajo y un valor a^* más alto con niveles de tueste más altos. La degradabilidad mejoró significativamente en las muestras tostadas y la muestra tostada oscura mostró el contenido de agua y el índice de acidez más bajos, aunque el valor de la actividad del agua fue el más favorable en la muestra tostada clara ($0.2 < a_w < 0.4$). En términos de idoneidad para el procesamiento, observaron una mayor temperatura de empastado y una disminución de la viscosidad máxima durante el tostado. Concluyeron que la muestra de tueste oscuro (40 min y 170 °C) mostró la mejor estabilidad de almacenamiento y funcionalidad, por lo que se seleccionó como un nivel de tueste óptimo. Esta investigación muestra el nivel óptimo de tueste, por tanto, ayuda a seleccionar el tiempo de tostado a emplear para obtener mejores resultados en la investigación.

Baquerizo (2023) evaluó la cinética de secado e isothermas de adsorción en dos variedades de oca (amarilla y roja), realizó el secado de estos tubérculos a 65 °C por un periodo de 8 horas. Mediante el análisis de la cinética de secado determinó la humedad crítica la cual arrojó valores de 0,059 kg de agua sobre kg sólido seco y 0,086 kg de agua sobre kg de sólido seco para Oca amarilla y roja, respectivamente. Utilizó siete modelos matemáticos para la cinética de secado (Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Logarítmico, Thomson y Fick), y observó que el modelo que mejor ajuste presentó es el de Newton. Para

construir las isothermas de adsorción uso sales con un rango de actividad de agua de 0,11 hasta 0,8. Y determinó que las harinas de Oca amarilla roja generan isothermas de tipo II. Los datos fueron ajustados a los modelos de BET y GAB, presentando el mejor ajuste el modelo de GAB. Sirve como referencia para construir las isothermas que son necesarias para determinar el valor de agua de monocapa valor que se busca determinar en esta investigación.

Rubira (2018) almacenó snack de harina de chontaduro y harina de maíz en cámaras con humedades relativas (HR) entre 10 y 75 %, para determinar la isoterma de sorción de agua del producto y estudiar la evolución de los compuestos bioactivos y de la capacidad antioxidante a los 2 y a los 4 meses de almacenamiento a partir del equilibrio en cada una de las HR, a temperatura ambiente, con el fin de establecer las mejores condiciones que permitan mantener las características funcionales del producto estables durante el tiempo. Reportó que los cambios producidos durante el almacenamiento en general son una disminución de los compuestos bioactivos y de la actividad antioxidante al aumentar la A_w y el tiempo. Recomienda que para garantizar la calidad funcional del producto se debe almacenar en humedades relativas inferiores a 43%, conservándose a temperatura ambiente, hasta 4 meses desde su envasado, el valor de monocapa encontrado según los modelos de GAB, BET y Caurie oscila entre 0.045 y 0.065 (g agua/g muestra base seca). Esta investigación sirve como referencia para determinar los rangos de humedad relativa a la que se debe almacenar la harina de linaza para obtener un valor de monocapa adecuado.

Polo (2023) estudió el efecto de la temperatura en el valor de la monocapa de harina de jengibre determinado por el modelo de GAB. Evaluó tres temperaturas (20 30 y 40 °C) en 168 horas, reportó que la humedad de equilibrio disminuye al incrementar la temperatura, alcanzando 0.365 (g agua/g muestra base seca), observando el mismo efecto de manera significativa el valor de monocapa que varió de 0.1069 a 20 °C a 0.0818 (g agua/g muestra

base seca) a 40 °C. Este estudio sirve como referencia en la metodología ya que usa diferentes temperaturas y determina el valor de la monocapa.

Alvarado et al. (2020). Estudiaron las isothermas de adsorción a 25 °C de harina de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): Pasankalla Roja (PR) y Negra Collana (NC) sin maltear y malteada, así como su vida útil. Las isothermas fueron determinadas colocando 2g de muestra en un analizador de actividad de agua. Se programaron lecturas de 0.05 a 0.90 de actividad de agua, para construir las isothermas y la humedad inicial se determinó por el método gravimétrico. Los datos experimentales fueron ajustados con los modelos matemáticos de GAB, BET, Henderson, Halsey y Oswin. Consideraron que el modelo de GAB es el mejor debido a tener parámetros con explicación física, las condiciones de almacenamiento para determinar el valor de monocapa fueron a 87% de humedad relativa y 25 °C. Concluyen que si se busca obtener un valor de monocapa mínimo influye el diseño de secado y proceso de la harina, por ejemplo para la harina de quinua sin maltear la temperatura de secado debe ser menor a la que se usa en el secado de la harina de quinua malteada, además mencionan que el valor de monocapa de harina de quinua es mayor debido al alto contenido de proteína con aminoácidos con afinidad al agua. Esta investigación sirve como referencia para el diseño de secado y el proceso de la harina para obtener valores de monocapa mínimos.

Allca (2022) determinó los parámetros de humedad relativa (%HR) y temperatura de almacenamiento mediante la estimación de las isothermas de adsorción, propiedades funcionales y vida útil de la harina de chuño blanco de papa andina. Para determinar las isothermas de adsorción de humedad de harina de chuño lo midió por el método gravimétrico estático a tres temperaturas (15, 25 y 35 °C), las humedades relativas fueron obtenidas con soluciones salinas saturadas con un rango de a_w entre 0.11 a 0.44. Para el modelamiento de las isothermas uso la ecuación GAB, encontró que las isothermas de adsorción mostraron un comportamiento tipo I. además menciona que la humedad de monocapa (X_m) depende de la temperatura, ya que está

aumentó de 0.2755 a 1.0191 g.H₂O/g.m.s., en el rango de temperaturas de 15, 25 y 35 °C. Este estudio sirve de referencia para delimitar las humedades relativas a la que será almacenada la harina de linaza.

Caruajulca (2019) determinó la vida útil de harina de tres variedades de arveja (*Pisum sativum* L.), sometidas a tres tiempos diferentes de tostado. Para la obtención de la harina se empleó tres tiempos diferentes de tostado (12, 20 y 25 minutos). Para obtener las isothermas de adsorción utilizó el método gravimétrico de soluciones saturadas de sal y la actividad de agua fue medido con el equipo AQUALAB 4 TEV. Los datos experimentales se modelaron utilizando las ecuaciones de GAB y de BET obteniendo isothermas de forma sigmoidea tipo II. El modelo de GAB presentó un buen ajuste, arrojando valores de humedad de monocapa (0.0403 y 0.0552 g agua/gm.s) mayores a los calculados con el modelo de BET (0.0119 y 0.0226 gagua/gm.s) para las tres temperaturas evaluadas (25, 30 y 35 °C). Además, menciona que el tiempo de tostado y la temperatura de almacenamiento influyen en el valor de monocapa, cuando la temperatura aumenta mayor será el valor de monocapa. Esta investigación sirve como referencia para la parte metodológica y para delimitar el tiempo de tostado.

5.2. Bases teóricas

5.2.1. Linaza

La linaza se refiere a las semillas de la planta de lino (*Linum usitatissimum*) pertenece a la familia linaceae, son más grandes que las semillas del sésamo y miden entre 4 y 6 mm, tiene una textura tostada y chiclosa con sabor agradable muy parecido a nuez; es conocida por su riqueza en ácidos grasos omega-3, fibra dietética y compuestos bioactivos. Científicamente, la linaza ha sido objeto de numerosos estudios debido a sus posibles beneficios para la salud. (Torres, 2023). Debido a que la linaza es una fuente importante de ácido alfa-linolénico, un ácido graso omega-3 esencial, lignanos, fitoquímicos con propiedades antioxidantes lo convierte en alimento funcional con potenciales beneficios para la salud cardiovascular,

además reduce el riesgo de trastornos degenerativos como la diabetes y la obesidad, y enfermedades crónicas como el cáncer (Kausar et al., 2024; Yachachin, 2013).

Composición nutricional. La composición nutricional de la linaza puede variar ligeramente en base a la variedad, ambiente de crecimiento y procesamiento (Torres, 2023), pero en general, es conocida por ser rica en ácidos grasos omega-3, fibra dietética y otros compuestos beneficiosos. Los ácidos grasos que lo constituyen son: poliinsaturados: ácido α -linolénico (55,4%), ácido linoleico (14,5%), el ácido γ -linolénico (0,2%); los ácidos grasos mono insaturados: ácido oleico (18,6%), ácido palmitoleico (0,2%); ácidos grasos saturados: ácido palmítico (6,1%), ácido esteárico (4,9%). Se dice que es una buena fuente de proteínas y está compuesta de 17 aminoácidos, el contenido de proteína de la mayoría de las variedades de linaza fluctúa entre 20 y 32 %. La linaza tiene fibras insolubles y solubles, incluyendo Insolubles son 75% y 25% solubles. Los minerales más importantes encontrados en semillas de linaza son: potasio, fósforo, hierro, zinc y manganeso. Además, la semilla de linaza contiene, vitaminas del grupo B, presenta también tocoferoles y tocotrienoles (Magro, 2015).

Tabla 1

Composición química proximal de la semilla de la linaza por cada 100 g

Componentes de linaza	Composición de la semilla
Humedad	4.0 %
Proteína	18.60 %
Grasa	42.03 %
Fibra	7.63 %
Cenizas	2.48 %
Carbohidratos	25.26 %

Nota. Tomado de Magro (2015).

5.2.2. *Harina*

De manera general la harina se define científicamente como el producto resultante de la molienda de granos, semillas o tubérculos, y es ampliamente utilizada en la industria alimentaria para la producción de una variedad de productos. Contiene una mezcla compleja de proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales que varían según la fuente y el proceso de molienda. La harina resulta de la trituración del grano mediante el uso de equipos que ayudan a conseguir tamaños de partículas muy finas, que luego son pasadas por tamices para uniformizar el tamaño de partícula (Edel y Rosell, 2007). Las harinas tienen diversos usos y están en función a sus propiedades tecnológicas las que están determinadas por las características físicas y químicas y la interacción entre componentes (proteínas, hidratos de carbono, pectinas, gomas), siendo estas propiedades uno de los criterios más importantes para definir el uso que se les dará a las harinas en la producción de los diversos alimentos (Figuerola et al., 2008).

Tipos de harina. La clasificación de las harinas se determina en función de: la calidad, tipo de materia prima, propiedades tecnológicas entre otras; dentro de cada tipo de harina encontramos a las harinas: integrales, refinadas, sin gluten, de fuerza, flojas entre otras (Rubio, 2020).

Otros autores como León (2020) mencionan que los tipos de harina están en función de la parte del grano o semilla usado para su obtención siendo estas:

Harina integral: contiene todas las partes de la semilla o grano, se muele incluyendo la cascara obteniendo así, una harina rica en fibras y minerales.

Harinas ½ 0, 0 y 00: son las que se obtienen de la porción del endospermo más externo o alejado de su centro (contra una fina capa llama aleurona, recubierta por el salvado), se utilizan principalmente para la fabricación de alimentos balanceados.

Harina 000: son las que se obtienen de moler el trigo u otro cereal, separando sólo el salvado y el germen, tiene la mejor calidad panadera, son también llamadas harinas de fuerza.

Harina 0000: es una harina blanca que se obtiene del centro del endospermo y tiene una mejor calidad pastelera conocida también como harinas flojas.

Harina de linaza. Para Pianesso et al. (2020) la harina de linaza es un subproducto ya que es obtenida después de su extracción de aceite, presenta alto contenido proteico y fibra. La harina de linaza resulta de la trituration de las semillas, es recomendable tostar las semillas para facilitar la molienda, mejorar sus características organolépticas y obtener mayor digestibilidad y disponibilidad de sus componentes (Figuerola et al., 2008). Esta harina es reconocida por su rico contenido en ácidos grasos omega-3, fibras dietéticas, proteínas y compuestos antioxidantes, su perfil nutricional ha suscitado un interés creciente en la industria alimentaria y entre los consumidores conscientes de la salud, exhibe propiedades funcionales notables, incluyendo su capacidad para formar geles viscosos debido a la presencia de mucílagos y polisacáridos. Esta característica hace que la harina de linaza sea útil como agente espesante y estabilizante en formulaciones alimentarias (Kajla et al., 2020). Debido a su perfil nutricional y propiedades funcionales, la harina de linaza se utiliza en una variedad de productos alimenticios, como panes, galletas, cereales y productos horneados. Su inclusión aporta beneficios para la salud, mejorando la textura y contribuyendo con sabores característicos (Figuerola et al., 2008).

5.2.3. *Proceso de Tostado*

El tostado es un proceso térmico que implica la aplicación controlada de calor a alimentos crudos para generar cambios en sus propiedades sensoriales, estructurales y nutricionales, esta poderosa tecnología de procesamiento influye en el aumento de las cantidades de compuestos aromáticos, comúnmente utilizado en granos de café, frutos secos,

granos y semillas, tiene un impacto significativo en el aroma, sabor y color de los alimentos, así como en la formación de compuestos bioactivos (Shi et al., 2018).

Durante el tostado, se produce una serie de reacciones químicas complejas, como la reacción de Maillard, la caramelización y la pirólisis, que contribuyen a la formación de compuestos volátiles responsables del aroma y sabor característicos del producto tostado, además, se observan cambios en la textura y color debido a las transformaciones en proteínas, azúcares y lípidos (García et al., 2016).

El tostado puede influir en la composición nutricional de los alimentos si bien se puede observar una disminución en algunos nutrientes sensibles al calor, como ciertas vitaminas, el proceso también puede aumentar la biodisponibilidad de otros compuestos, como antioxidantes. Además, puede ayudar a la remoción de algunos compuestos antinutricionales. Sin embargo, el contenido de peróxidos, propanal y hexanal aumenta durante el almacenamiento en mayor grado en las semillas tostadas que en las semillas naturales (Figueroa et al., 2008). Por su parte (Youn y Chung, 2012) mencionan que durante el tostado se manejan dos variables o condiciones muy importantes que son la temperatura y el tiempo; las temperaturas y tiempos de tostado óptimo dependen de varios factores, como el grado de tostado, el tipo de tostador y el tipo, variedad, madurez y contenido de humedad de la materia prima.

Técnicas de tostado. Según IICA como se citó en Caruajulca (2019) existen dos técnicas de tostado, básicamente se diferencian en el que tenga o no contacto de los granos con la fuente de calor, estas son:

Técnica de tostado indirecto. en este sistema los granos no están en contacto con la fuente de calor, ya que se encuentran dentro de un cilindro y este a su vez dentro de un horno.

Técnica de tostado directo. Esta técnica consiste aplicar aire caliente o llama directamente a los granos.

Métodos de tostado. Según Aldave (2016) existen diferentes métodos de tostado entre ellos está:

Tostado en seco. Consiste en tostar alimentos directamente en una superficie caliente, como una sartén o una plancha, sin añadir ningún tipo de grasa.

Tostado al horno. Consiste en colocar los granos en una bandeja y se exponerlo al calor del horno, puede realizarse con o sin la adición de aceite.

Tostado por infrarrojos. Este método utiliza radiación infrarroja para calentar rápidamente la superficie de los alimentos, generando un tostado más rápido y uniforme.

Tostado por convección. Este método utiliza aire caliente en movimiento para tostar los alimentos de manera uniforme.

Tiempo de tostado. Es una variable importante en el proceso de tostado, debido a que el desarrollo del color y aroma dependen de esta condición, este intervalo de tiempo dependerá de la humedad con la que ingrese el grano al tostador, esto se puede estimar por medio de una curva de tiempo de tostado, la cual indica el tiempo que se debe tostar con relación a la humedad inicial de los granos a una temperatura determinada, otros factores que determinan el tiempo de tostado es el tamaño del grano, la tostadora y la costumbre del mercado consumidor (Aldave, 2016; Caruajulca, 2019).

El tiempo de tostado en linaza se refiere al período específico durante el cual las semillas de linaza son sometidas a calor en un proceso controlado con el objetivo de desarrollar características sensoriales deseadas y optimizar la calidad del producto final, este tiempo de exposición al calor es crítico, ya que afecta directamente las propiedades sensoriales, el perfil de sabor y la estabilidad nutricional de las semillas tostadas, un tiempo de tostado adecuado también es crucial para preservar los nutrientes esenciales presentes en la linaza, como ácidos grasos omega-3 y antioxidantes, mientras se elimina la humedad y se mejora la estabilidad del producto (Figuerola et al., 2008).

5.2.4. Granulometría

La granulometría en las harinas se refiere a la distribución de tamaños de partículas presentes en el producto molido, este análisis se realiza para evaluar la uniformidad de la molienda y tiene implicaciones directas en las propiedades funcionales y sensoriales de las harinas. La medición de la granulometría proporciona información detallada sobre el tamaño y la distribución de las partículas, lo que es esencial para comprender y controlar diversos aspectos del procesamiento y calidad de las harinas (Puma, 2017).

La granulometría evalúa la presencia de partículas de diferentes tamaños en la harina, desde partículas gruesas hasta finas, proporcionando un perfil completo de la textura y la consistencia del producto molido, afecta directamente propiedades funcionales como la capacidad de absorción de agua, la viscosidad y la capacidad de formar geles, lo que impacta en la calidad y procesabilidad de productos como panes y masas (Edel y Rosell, 2007).

Para separar las partículas pequeñas de las grandes se realiza un proceso llamado ensayo de granulometría que consiste en pasar el producto de la molienda por tamices de diferente tamaño, donde cierta cantidad de harina queda retenida en los tamices los cuales están ordenados de forma que en la parte superior se encuentra el de mayor apertura y en la parte inferior el de menor tamaño de partícula, resulta ser una característica importante puesto que brinda información acerca del proceso de molienda de la harina de trigo, en específico de la clasificación y reducción (Puma, 2017).

5.2.5. Isotermas de sorción

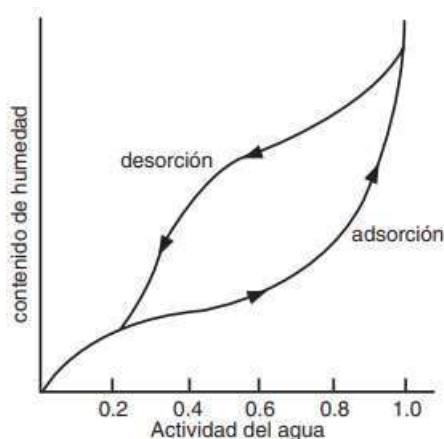
Determinación de las isotermas de sorción son presentaciones gráficas que describen la relación entre la actividad de agua (A_w) y la cantidad de agua que un producto alimenticio puede adsorber o desorber en equilibrio a una temperatura y presión específicas, estas isotermas son fundamentales para comprender y predecir los cambios en la humedad de un alimento en respuesta a variaciones en la actividad de agua en su entorno (Talens, 2020).

La isoterma de adsorción son representaciones gráficas de la cinética con la que un producto adsorbe humedad y se hidrata, resulta importante conocerla ya que refleja el comportamiento de los alimentos deshidratados almacenados en atmósferas húmedas (higroscopicidad), de manera semejante, la desorción equivale al proceso de deshidratación y refleja la forma como pierde agua, para graficar estas curvas es necesario calcular la humedad y la actividad de agua, cuando esto alcanza el equilibrio en un sistema cerrado (Fennema y Tannenbaum, 1996). Estas curvas sirven para diseñar los sistemas de secado, almacenamiento, rehidratación, entre otros, también ayudan a predecir la estabilidad de los alimentos almacenados en distintas condiciones (Badui, 2006).

Según la clasificación de S. Brunauer, las isotermas pueden ser de cinco tipos con muy pocas acepciones tal como se muestra en la figura 2.

Figura 1.

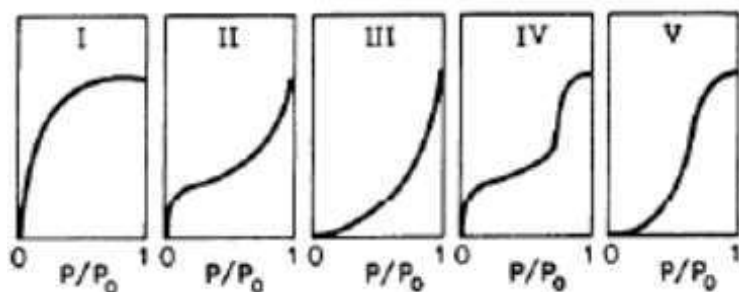
Curvas típicas de las isotermas de adsorción y desorción de los alimentos



Nota. Tomado de (Badui, 2006)

Figura 2.

Tipos de isothermas de adsorción y desorción de los alimentos



Nota. Tomado de (Ramírez 2012 como se cita, em Caruajulca, 2019)

Importancia de las isothermas. Basilio (2015) menciona que las isothermas de sorción de humedad de alimentos son importantes para comprender y controlar la relación entre la actividad de agua y la humedad en los alimentos, lo que influye directamente en su calidad, procesabilidad y estabilidad a lo largo del tiempo; asimismo permiten determinar: el calor de sorción o desorción, la interacción del agua y sus componentes, las propiedades estructurales (área superficial específica, volumen de poros, distribución del tamaño de poros y cristalinidad), las condiciones críticas de humedad, y consecuentemente el nivel de protección al vapor de agua y las propiedades de sorción de vapor de agua de biopolímeros.

Determinación de las isothermas. Se determina utilizando distintas cámaras cerradas herméticamente que en su interior se generan humedades relativas conocidas, usando diferentes sales saturadas con actividad de agua conocida, al introducir el alimento en estas cámaras; logra alcanzar el equilibrio, se cuantifica el contenido de agua, con lo que se obtiene valores que se grafican (Badui, 2006).

Basilio (2015) asegura que ningún modelo de isoterma puede representar a todos los alimentos, se han realizado varios intentos para modelar (caracterización matemática), alcanzar la conformidad de un modelo, en todo el intervalos de los datos experimentales es casi imposible, se han explorado muchos modelos matemáticos para modelar las isothermas de

una infinidad de alimentos, entre los más usados hasta la actualidad son el modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) y el modelo de Brauner, Emmett y Teller (BET).

Modelo de Brauner, Emmett y Teller (BET). Es el modelo más antiguo y mejor conocido, describe adecuadamente el equilibrio entre el vapor de agua y el agua adsorbida sobre la matriz sólida que forma el alimento (Fennema y Tannenbaum, 1996), es muy utilizado para determinar el valor del contenido de humedad de monocapa en alimentos, las dos constantes obtenidas del modelo de B.E.T. son el contenido de humedad de monocapa W_0 y característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción C . Ambas constantes derivadas de la ecuación de Langmuir a altos valores de presión. Sin embargo el modelo de BET solo se ajusta a isotermas dentro de un intervalo limitado de actividad de agua, pero cabe mencionar que el valor de monocapa de BET da como punto de referencia del contenido de humedad más estable para alimentos secos (Ramírez et al., 2014). La ecuación de B.E.T. se muestra en la ecuación 1.

$$X = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (1)$$

Donde:

X_m : es el contenido de humedad del producto correspondiente a una capa monomolecular de agua absorbida.

C : constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción.

El Modelo BET, se utiliza para describir la sorción de humedad en alimentos con una superficie relativamente plana y homogénea, es adecuado para alimentos con un contenido de humedad bajo (< 30%) y se basa en la teoría de la adsorción multicapa.

Modelo de Guggenheim Anderson de Boer (GAB). Para Fennema y Tannenbaum, (1996) este modelo desarrollado es el más confiable adaptable y amplio, muy usado para alimentos con rangos de actividad de agua hasta de 0.9, es decir se ajusta para la mayoría de

alimentos, este modelo incluye una constante adicional a las que presenta el modelo de BET, sin embargo, ambos modelos están basados en los mismos principios de la monocapa, el modelo GAB asume que las moléculas en multicapas, tienen interacciones con el adsorbente en valores energéticos similares a los que tienen las moléculas de la monocapa (Ramírez et al., 2014). La ecuación de GAB se muestra en la ecuación 2.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (c - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

X_m: humedad de equilibrio, humedad del producto correspondiente a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua.

C: constante de Guggenheim, características del producto y relacionada con el calor de sorción de la monocapa.

K: factor de correlación relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

El modelo GAB, se utiliza para describir la sorción de humedad en alimentos con una superficie irregular y heterogénea, es adecuado para alimentos con un contenido de humedad medio a alto (30-80%) y se basa en la teoría de la adsorción multicapa y considera la interacción entre las moléculas de agua y la superficie del alimento.

5.2.6. Agua de monocapa

El agua de monocapa se refiere al agua que se encuentra en la zona I, se refiere a la capa de agua que se adsorbe y forma una película monomolecular en la superficie de ciertos materiales sólidos, este fenómeno es particularmente relevante en el contexto de la adsorción y la superficie de sólidos porosos. El agua de monocapa es la más difícil de eliminar en los procesos comerciales de secado, así mismo representa el contenido de humedad donde se minimizan las reacciones bioquímicas o de mayor estabilidad y es la región de la isoterma donde los alimentos tienen el valor máximo de vida de anaquel (Ramírez et al., 2014).

5.3. Definición de términos

5.3.1 *Actividad de agua (A_w)*

Es una medida de la disponibilidad de agua en un alimento para reacciones químicas y biológicas. La actividad de agua se define como la relación entre la presión de vapor del agua en el alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

5.3.2 *Agua de monocapa*

El contenido de agua de monocapa se refiere a la cantidad de agua adsorbida en la superficie de un material hasta que se forma una monocapa, es decir, una capa de moléculas de agua que cubre completamente la superficie, el agua que se encuentra en la zona I de la isoterma, en la adsorción de agua de monocapa, las moléculas de agua se adhieren a la superficie del material sólido formando una capa única, con una disposición molecular organizada; esta capa puede afectar las propiedades físicas y químicas del material, así como su interacción con sustancias circundantes. (Badui, 2006) se refiere a la capa más externa de moléculas de agua que se adsorben en la superficie de un alimento. Esta capa es importante porque influye en la textura, la estabilidad y la calidad del alimento.

5.3.3 *Capacidad de retención de agua*

Es la cantidad de agua que puede ser atrapada o retenida por una matriz proteica bajo condiciones específicas, influenciada por las interacciones entre proteínas y factores ambientales. Esta propiedad afecta la textura, el color y las características sensoriales de los productos alimenticios, impactando así su calidad y estabilidad durante el almacenamiento (Shen et al., 2022).

5.3.4 *Granulometría*

La granulometría detalla específicamente el tamaño de partículas de la harina y evalúa la presencia de partículas de diferentes tamaños en la harina, desde partículas gruesas hasta finas, proporcionando un perfil completo de la textura y la consistencia del producto molido,

además es importante para evaluar la calidad final del producto y la uniformidad de la molienda, el instrumento más usado en la granulometría son las zarandas con dimensiones de 125, 250 y 500 micras (Puma, 2017).

5.3.5 *Harina*

La harina es un producto obtenido de la molienda de granos o semillas, principalmente de cereales como trigo, maíz, arroz o centeno, pero también de legumbres, tubérculos y otros alimentos ricos en almidón. Este proceso de molienda convierte los granos en partículas finas, creando un polvo que se utiliza como ingrediente fundamental en la preparación de una amplia variedad de alimentos (Figuerola et al., 2008).

5.3.6 *Influencia de la cantidad de carbohidratos*

Los carbohidratos, especialmente los azúcares y los almidones, pueden influir en la sorción de humedad y la actividad de agua en alimentos. Los carbohidratos pueden absorber agua y aumentar la actividad de agua, lo que puede afectar la textura y la estabilidad del alimento.

5.3.7 *Isotermas de sorción*

Las isotermas de sorción son representaciones gráficas que describen la relación entre la cantidad de agua de adsorción o desorción de un material y la actividad de agua en el entorno circundante, a una temperatura y presión constantes. Estas curvas son fundamentales para comprender el comportamiento higroscópico de diferentes alimentos y materiales porosos, ya que proporcionan información sobre la interacción entre la humedad y el material (Talens, 2020).

5.3.8 *Linaza*

La linaza es un cultivo oleoso que contiene un nivel considerable de proteína (25-35%) y una alta fuente de ácidos grasos poliinsaturados ω -3 y produce harina de linaza como subproducto después de la extracción del aceite (Saleh et al., 2022).

5.3.9 *Tiempo de tostado*

El tiempo de tostado se refiere al periodo durante el cual un alimento, generalmente granos, frutos secos o semillas, es expuesto al calor con el propósito de desarrollar cambios físicos y químicos que afectan su sabor, aroma, textura y color. Este proceso es comúnmente utilizado en la preparación de una variedad de alimentos, por ejemplo la harina a partir de las semillas de linaza (Aldave, 2016).

5.3.10 *Sales saturadas*

Una sal saturada es una mezcla en la que se disuelve la máxima cantidad posible de soluto (sal) en una cantidad determinada de disolvente, lo que da como resultado un equilibrio térmico con el soluto puro (Basilio, 2015).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación

Esta investigación se desarrolló de la siguiente manera, el proceso productivo de la harina de linaza y la evaluación del contenido de agua de monocapa se realizó en el laboratorio de Análisis de Alimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Cajamarca ubicada en la ciudad de Cajamarca, geográficamente se encuentra localizada entre las coordenadas 7° 10' 06" S Latitud Sur y 78° 29' 43" W Longitud Oeste, a una altitud de 2683 msnm.

Figura 3.

Ubicación de laboratorio Universidad Nacional de Cajamarca.



Nota. Tomado de Google Maps.

6.2. Equipos y materiales

6.2.1. Materia prima e insumos

La materia prima corresponde a 3 kg de linaza de la variedad marrón, la cual se obtuvo por compra directa del mercado central de la ciudad de Cajamarca.

6.2.2. Reactivos

- Cloruro de sodio
- Ácido sulfúrico
- Cloruro de magnesio
- Tiosulfato de sodio
- Cloruro de litio
- Cromato de potasio
- Acetato de potasio

6.2.3. Equipos

- Determinador de actividad de agua AQUALAB (4 TE Dew Point Water Activity Meter SERIE S40005228)
- Balanza analítica (Mettler Toledo SERIE AB204-S/FACT)
- Estufa (Hot Air Oven DSO-300D, SERIE. 0711259)
- Molinillo eléctrico JUBAKE[®] COFFEE GRINDER, AC220 – 240V
- Tostador semiindustrial, elaborado específicamente para este estudio) capacidad 2kg.

6.2.4. Materiales de laboratorio

- Zarandas granulometría BOLIN-674 N° 120, 60 y 35 de 125, 250 y 500 micras.
- Campanas de desecación.
- Placas Petri
- Probetas
- Vasos de precipitación

6.2.5. Otros materiales experimentales

- Guantes látex
- Mascarilla

- Mandil
- Gorro
- Mesa de trabajo de acero inoxidable
- Papel toalla
- Alcohol
- USB
- Tijera
- Lapicero
- Cuaderno
- Laptop

6.3. Metodología

6.3.1 Variables

Variables independientes

- Tiempo de tostado: (5, 10 y 15 min)
- Granulometría (125, 250 y 500 micras)

Variable dependiente

- Agua de monocapa (monocapa de GAB y de BET)

6.3.2 Diseño experimental y arreglo de los tratamientos

El método estadístico corresponde a un diseño estadístico DCA con arreglo factorial 2^3 (combinaciones de los factores y de los niveles) en total 9 corridas (Tabla 2), donde se realizó un ANOVA para la variable dependiente, y a continuación, al existir diferencias significativas ($p < 0.05$), mediante la gráfica de efectos principales de cada factor se determinó

el mejor tratamiento. Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Para procesar los datos se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión XVI.I.

Los factores en estudio son 2: tiempo de tostado (A) y granulometría (B), cada factor se dividió en 3 niveles obteniendo los niveles A1, A2, A3; B1, B2 y B3. La combinación de estos niveles da 9 tratamientos para la investigación.

Tabla 2

Arreglo de los tratamientos

Factores	Niveles	Combinaciones	Tratamientos
A: tiempo de tostado	A1 5 min	A1*B1	T1
		A1*B2	T2
	A2 10 min	A1*B3	T3
B: Granulometría	A3 15 min	A2*B1	T4
	B1 125 micras	A2*B2	T5
		A2*B3	T6
		A3*B1	T7
	B2 250 micras	A3*B2	T8
		A3*B3	T9

Fuente: Elaboración propia

Los tratamientos evaluados fueron 9, combinando el factor A (Tiempo de tostado) con el factor B (granulometría).

6.3.3 Procedimiento

Obtención de la harina de linaza. En este trabajo de investigación se utilizó linaza de la variedad marrón, se compró directamente del mercado central de Cajamarca 3 kilogramos de linaza, fueron transportados en bolsas de polietileno de alta densidad hasta el laboratorio de análisis de alimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias para continuar con el proceso que se describe a continuación:

- **Recepción de la materia prima:** es la primera operación unitaria que se hace para la obtención de la harina de linaza, para llevar a cabo esta operación se hizo la recepción de 3 kilogramos de semillas de linaza cruda para posterior proceso.
- **Selección y clasificación:** se clasificó 3 kilogramos de semilla de linaza libres de daños físicos y biológicos, obteniendo 2.900 kg de grano libres de daño físicos y biológicos, enteras con buena apariencia física.
- **Pesado:** se utilizó una balanza digital, para pesar la cantidad de linaza que se utilizará en la elaboración de harina 2.9 kg.
- **Lavado del grano:** esta operación se basa en el lavado de la semilla de linaza con una corriente de agua fría con el propósito de eliminar suciedad, contaminantes y algunos antinutrientes (Baquerizo, 2023).

Tomar en cuenta que; al lavar la linaza, esta libera mucílago, una sustancia viscosa que hace que las semillas se vuelvan pegajosas y tiendan a formar grumos. Esto dificulta un tostado uniforme, ya que el calor no llega por igual a todas las partes de la semilla si estas están amontonadas, es por ello que se realiza el siguiente procedimiento.

- **Secado:** La semilla húmeda se colocó en una bandeja de acero inoxidable para optimizar el secado, el cual se realizó en una estufa a una temperatura de 50 °C, hasta eliminar el exceso de humedad producida por el lavado (García, 2021).

Nos aseguramos de escurrirlas lo mejor posible y distribuirlas en una capa delgada, para hacerla uniforme y a menor tiempo, aproximadamente una bandeja duró entre 20 y 30 min de secado, si colocáramos capas gruesas de grano, el secado no sería uniforme en todos los granos y el tiempo sería mayor.

Figura 4.

Oreado de la semilla de linaza



Nota: la figura muestra el oreado de la linaza después del lavado

- **Tostado:** esta etapa consistió en exponer a las semillas al calor seco generado por una tostadora semi industrial de 2 kilogramos de capacidad con hasta 230 RPM donde el calor se distribuye de manera uniforme, se realizó a una temperatura constante de 170 ° C durante 5, 10 y 15 minutos (Pacheco et al., 2020).

El tiempo de tostado aumenta si la semilla está húmeda, pero si se seca completamente antes de tostar, el tiempo de contacto con el fuego directo vuelve a ser similar al de la semilla original, aunque con un mayor riesgo de que las semillas queden pegadas entre sí, sin embargo, el horno utilizado para este procedimiento cuenta con RPM, lo que nos ayuda mantener un movimiento constante que evita que el grano se pegue entre si.

Figura 5.

Tostado de la semilla de linaza



Nota: la figura muestra la tostadora semi industrial utilizada en el tostado de los granos de linaza.

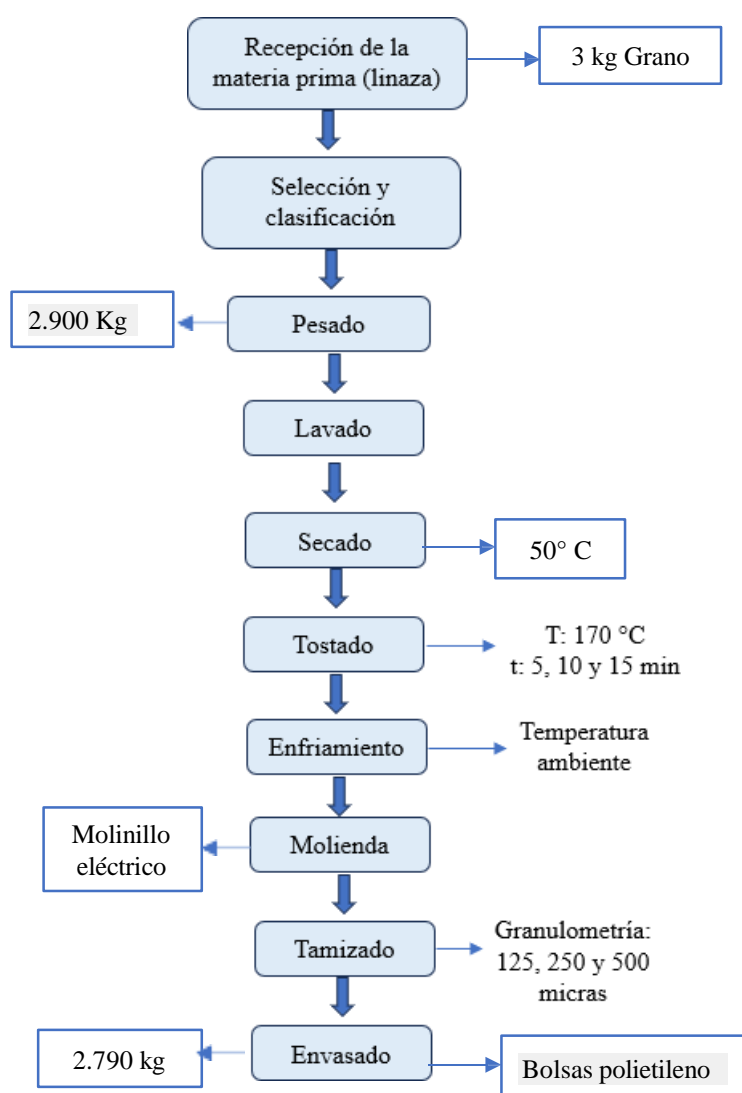
- **Enfriamiento:** Después de tostar, las semillas de linaza se dejaron enfriar antes de ser procesadas, esta operación se llevó a cabo a temperatura ambiente hasta alcanzar el equilibrio entre la temperatura del grano y el entorno para evitar la acumulación de humedad.
- **Molienda:** La molienda se realizó en un molinillo eléctrico JUBAKE[®] COFFEE GRINDER, AC220 – 240V, que consiste en la reducción del tamaño de las semillas. Las semillas de linaza se introdujeron en la tolva del molino de granos, donde se trituraron y pulverizaron, este proceso rompe las estructuras celulares de las semillas, liberando los nutrientes internos (García, 2021). El total de harina obtenida después de la molienda fue 2.790 kg.
- **Tamizado:** el tamizado se realizó de forma manual usando zarandas de granulometría Bolin-674, de tamaño 125, 250 y 500 micras, con códigos 120, 60 y 35 para finalmente

obtener la harina de linaza, con diferentes granulometrías. se obtuvo 500 g de harina de cada granulometría.

- **Envasado:** La harina obtenida se envaso en bolsas de polietileno selladas para protegerlos de agentes externos y preservar sus características físicas y químicas, hasta su posterior análisis (Polo, 2023).

Figura 6.

Diagrama de flujo para la obtención de harina de linaza



Nota. Adaptado de Caruajulca (2019)

6.3.4 Determinación de isothermas de adsorción

La determinación de las isothermas se hizo mediante el método reportado por Bel y Labuza (2000) modificado por Caruajulca (2019) que consiste en usar soluciones acuosas de sales saturadas con actividad de agua conocido, el método estático de 6 soluciones salinas saturadas LiCl; CH₃COOK; MgCl₂; NaCl; K₂ CrO₄ ; Na₂S₂O₃. En la Tabla 3 se presenta valores de distintas sales saturadas y sus respectivos valores de humedad en equilibrio.

Tabla 3

Humedades relativas a diferentes soluciones de sales preparadas

Sales	Humedad Relativa (%HR) a temperatura ambiente
LiCl	11.3
CH ₃ COOK	22.5
MgCl ₂	32.9
NaCl	75.5
K ₂ CrO ₄	91.07
Na ₂ S ₂ O ₃	97.45

Nota: tomado de Rodríguez (2015)

Las soluciones salinas fueron colocadas en la base de envases de vidrio herméticos que fueron acondicionados para el experimento y en cada uno de ellos se colocaron vasos de vidrio que contenían 1.5 gramos de muestra (harina de linaza). Los envases fueron colocados a temperatura ambiente durante 10 días, necesarios para llegar a la condición de humedad en equilibrio. Después se determinó la humedad de equilibrio por balance de materia con el contenido de humedad inicial y la pérdida o ganancia de peso y la actividad de agua fue medido con el equipo AQUALAB 4 TEV.

6.3.5 Evaluación del contenido de agua de monocapa

Los valores experimentales obtenidos fueron ajustados por los modelos matemáticos de GAB y de BET, mediante estas ecuaciones se determinó el valor de monocapa, para ello se hizo uso del software Statistica 10, mediante la aplicación de regresión no lineal (Anexo 6).

Se utilizaron los modelos matemáticoa Gab y Bet, porque describen la relación entre la humedad absorbida y la actividad de agua, siendo cruciales para predecir la vida útil y la estabilidad de los alimentos. Aunque BET solo se ajusta a isotermas dentro de un intervalo limitado de actividad de agua, cabe mencionar que el valor de monocapa de Bet da como punto de referencia del contenido de humedad más estable para alimentos secos (Ramírez et al., 2014), como lo es la harina de linaza. Por otro lado; el modelo Gab, es el más confiable adaptable y amplio, muy usado para alimentos con rangos de actividad de agua hasta de 0.9, es decir se ajusta para la mayoría de alimentos, este modelo incluye una constante adicional a las que presenta el modelo de Bet; sin embargo, ambos modelos están basados en los mismos principios de la monocapa.(Ramírez et al., 2014).

La calidad del ajuste se evaluó empleando el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E). Calculados de acuerdo con las ecuaciones (3) y (4).

En Microsoft Office Excel, 2016.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{BET (1)}$$

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots\dots\dots \text{GAB (2)}$$

$$R^2 = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{(\sum Y - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \dots\dots\dots (4)$$

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Influencia de diferentes tiempos de tostado y granulometría en el contenido de agua de monocapa en la harina de linaza

7.1.1. Determinación de las isothermas de sorción de humedad en la harina de linaza

Para determinar la humedad en equilibrio de la harina de linaza se obtiene a temperatura ambiente ya que ella determina el comportamiento a diferentes actividades agua.

Cuando un producto seco se almacena en atmósferas de humedad relativa elevadas (mayor a 50 %), ocurre transferencia de masa del gas al sólido hasta llegar a un equilibrio (g agua/100 g ms), al repetir este experimento con diferentes humedades, se tienen valores que al graficarse crean la isoterma de adsorción (Badui, 2013).

En los anexos 2, 3 y 4 se registra la humedad en equilibrio de la harina de linaza de granulometría distinta en diferentes disoluciones saturadas de sal con conocida actividad de agua. Estos valores representan el promedio de las repeticiones (3 repeticiones por cada tratamiento).

El contenido de humedad es un factor decisivo que impacta en el almacenamiento seguro de la harina y está profundamente influenciado por las condiciones en que se conserva. Por lo general, la harina de cereales presenta un bajo nivel de humedad, lo que la hace microbiológicamente más segura. Pero, durante periodos prolongados de almacenamiento, su calidad puede deteriorarse por completo (Liu et al., 2022). Se ha reportado que, con variaciones en las condiciones de manipulación y molienda, la harina presenta un contenido promedio de humedad entre el 6 % y el 13 %. A pesar de ello, se ha observado que este valor puede incrementarse considerablemente durante el almacenamiento (Yupanqui, 2023).

El contenido de humedad es crucial para el almacenamiento seguro de la harina, y está influenciado por las condiciones de conservación. La harina de cereales generalmente tiene un bajo nivel de humedad, pero puede deteriorarse durante periodos prolongados de

almacenamiento (Liu et al., 2022). El contenido de humedad en equilibrio en los anexos 2, 3 y 4 varió entre 0.01 y 0.19 g agua/100 g ms, siendo mayor para la harina de 500 micras con 5 minutos de tostado. Esto se debe a que la granulometría afecta la disponibilidad para la adsorción de agua, y las partículas más pequeñas presentan mayor superficie específica, lo que genera un aumento en la humedad de equilibrio (Matos y Rajo, 2010).

Los resultados muestran que el modelo GAB es más adecuado para describir la adsorción de humedad en harinas tostadas de linaza en un rango amplio de actividad de agua, mientras que el modelo BET tiene limitaciones en valores altos de a_w . Los cambios estructurales inducidos por el tostado influyen en la capacidad de adsorción de agua, lo que puede tener implicaciones en la estabilidad y almacenamiento del producto final.

La isoterma de adsorción describe la dinámica con la que un alimento captura humedad y se hidrata, reflejando el comportamiento higroscópico de productos deshidratados en condiciones de almacenamiento con alta humedad, estas curvas permiten determinar las condiciones óptimas de almacenamiento, así como evaluar el sistema de secado, deshidratación, diseño de envases y otros aspectos relacionados, además, son útiles para predecir la estabilidad de los alimentos durante su almacenamiento (Badui, 2006).

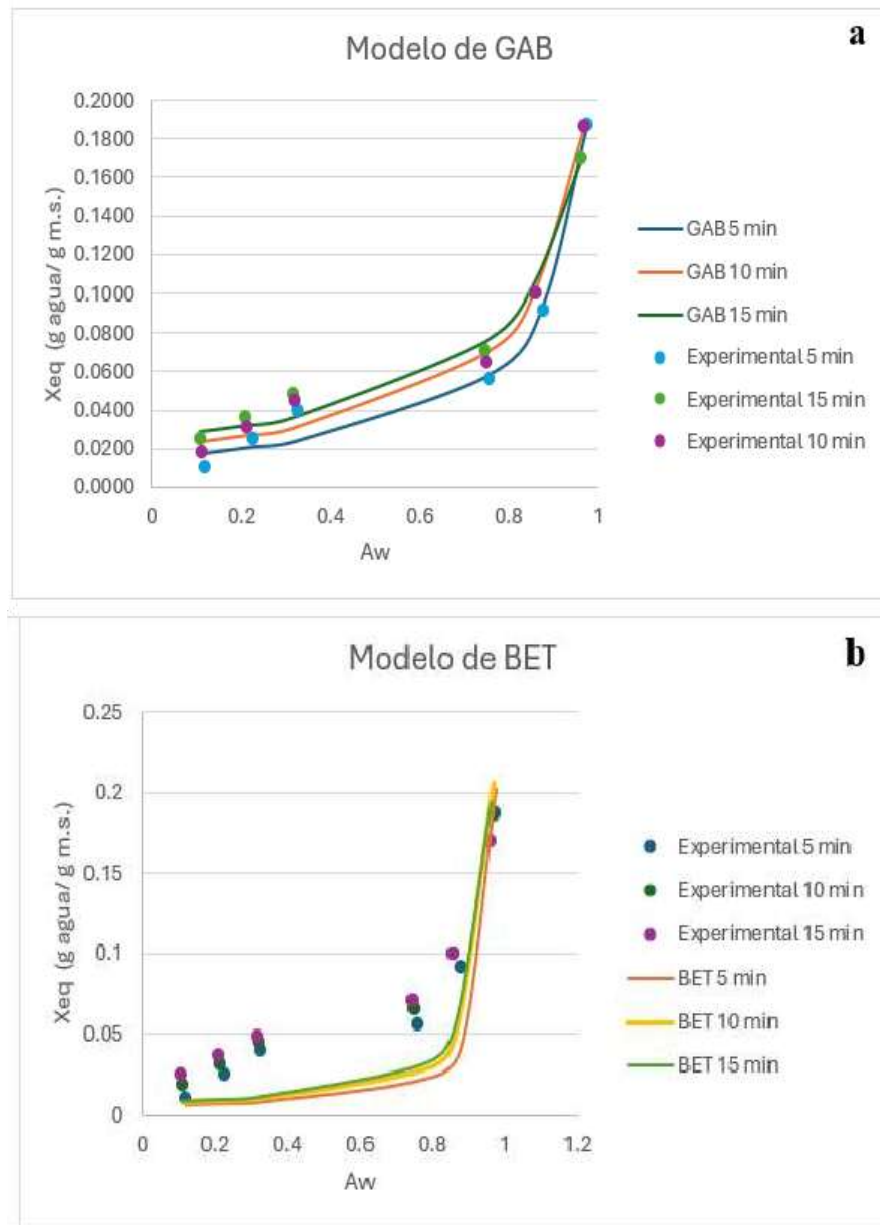
Se aprecia que el modelo GAB es más preciso que el modelo BET, ya que la curva proyectada se ajusta más a los datos experimentales para todos los tratamientos, especialmente a bajas humedades y los valores de X_{eq} calculados con el modelo GAB aumentan con el tiempo de tostado, lo que sugiere que el modelo captura la tendencia de la harina de linaza a volverse más higroscópica; en tanto el modelo BET es menos preciso que el modelo GAB, especialmente a altas humedades y los valores de X_{eq} calculados con el modelo BET también aumentan con el tiempo de tostado, pero la tendencia es menos clara que con el modelo GAB.

Las isotermas de adsorción de humedad de la harina de linaza de las tres granulometrías y obtenida mediante tres tiempos diferentes, tanto las experimentales como las modeladas por

GAB y BET corresponden al Tipo II, que se divide en tres regiones: monocapa (0-0.12 de actividad de agua), multicapa (0.12-0.70) y agua libre (0.70-0.95) (Yupanqui, 2023), caracterizadas por su forma sigmoide, indicativa de un proceso de adsorción física en múltiples capas. Esto se refleja en la saturación progresiva de las superficies disponibles para la adsorción de humedad, según Agama (2018). Resultados similares fueron encontrados por Ramírez (2011) para harina de maíz y Caruajulca (2019) para harina de arveja. Este comportamiento se debe a la composición nutricional de la harina de linaza, es rica en carbohidratos, proteínas y fibras, que interactúan con el agua en distintas formas, como se describe en Magro (2015).

Figura 7.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 500 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y por los modelos matemáticos de GAB y de BET



La Figura 7a muestra la isoterma de adsorción de la harina de linaza con una granulometría de 500 micras para tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos). Se presentan los valores experimentales junto con las curvas de ajuste del modelo GAB (para cada tiempo de tostado) y en la Figura 7b se comparan los datos experimentales con las curvas ajustadas por el modelo BET.

Se observa una curva de adsorción de agua que aumenta rápidamente con la actividad de agua, específicamente a partir de una A_w de 0.70 la pendiente de la curva aumenta de manera significativa, lo que indica que la adsorción de agua es mayor si la harina de linaza se almacena a valores de humedad relativa por encima del 70%. De esta gráfica se entiende que sobre una A_w de 0.7 hay un aumento de actividad enzimática y del movimiento entre las moléculas de agua, carbohidratos y proteínas.

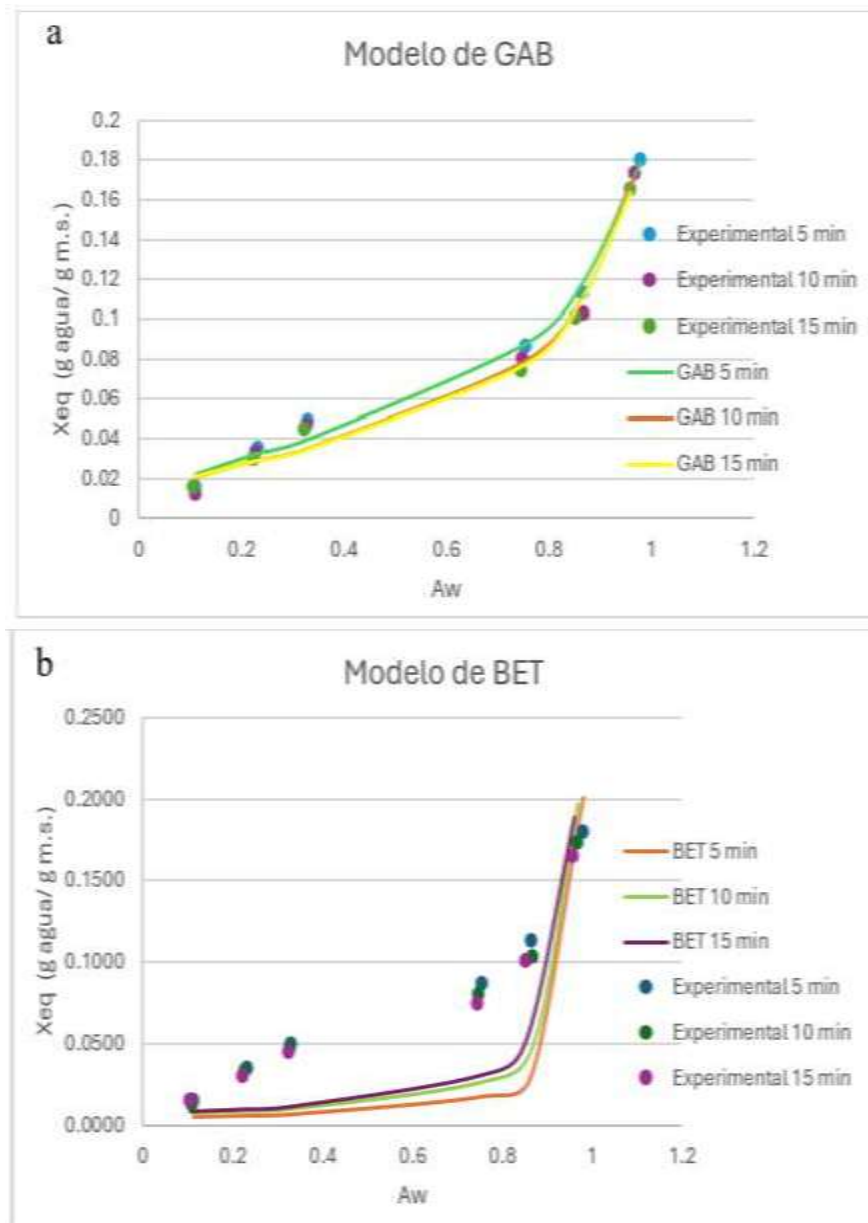
El modelo GAB coincide bien con los datos experimentales en todos los rangos de actividades de agua, y a medida que aumenta el tiempo de tostado, la cantidad de agua adsorbida aumenta. Mientras que el modelo BET se ajusta mejor en valores bajos de A_w ($A_w < 0.5$). En $A_w > 0.8$, la curva muestra un aumento drástico de la adsorción de humedad, lo que indica que a alta humedad relativa el alimento absorbe agua rápidamente, posiblemente por la presencia de componentes higroscópicos. Esto coincide con la literatura, se ha reportado que el tostado puede reducir la adsorción de agua en ciertos productos al desnaturalizar proteínas y modificar la porosidad del material (Magro, 2015).

Se observa que las isothermas presentan una forma sigmoidea en ambos modelos, típica de materiales alimentarios con alta presencia de compuestos hidrofílicos. A bajas A_w (< 0.3), la adsorción de agua es baja y aumenta de manera significativa en valores altos de A_w (> 0.6), lo que sugiere una mayor retención de agua en condiciones de alta humedad ambiental. A medida que la isoterma se aproxima a la unidad, adquiere una forma asintótica, reflejando la saturación progresiva de las superficies disponibles para la adsorción de humedad, las isothermas muestran una forma asintótica conforme la isoterma se acerca a la unidad Agama (2018). Investigaciones han demostrado que el modelo GAB es uno de los más adecuados para describir la adsorción de agua en harinas de semillas oleaginosas como la linaza (Salinas, 2024).

Se evidencia que el tiempo de tostado de 15 min muestra la mayor humedad de equilibrio, mientras que el tiempo de tostado de 5 min muestra la menor, este comportamiento se observa tanto para datos experimentales como para los modelados por GAB y BET. Cuyos resultados se pueden atribuir a diversos cambios estructurales generados por tratamientos térmicos prolongados, entre estos está la degradación parcial de mucílagos y proteínas, lo que incrementa los sitios hidrofílicos disponibles para la adsorción de agua. Según Bonilla et al. (2024), los tratamientos térmicos en linaza modifican la estructura de los lignanos, generando polímeros más activos para la interacción con el agua. Un estudio sobre harina de chía reportó que el aumento en la temperatura de procesamiento reduce la capacidad de adsorción de agua, debido a la desnaturalización de proteínas y modificación de polisacáridos (Bautista et al., 2007).

Figura 8.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 250 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y modelos GAB y BET.

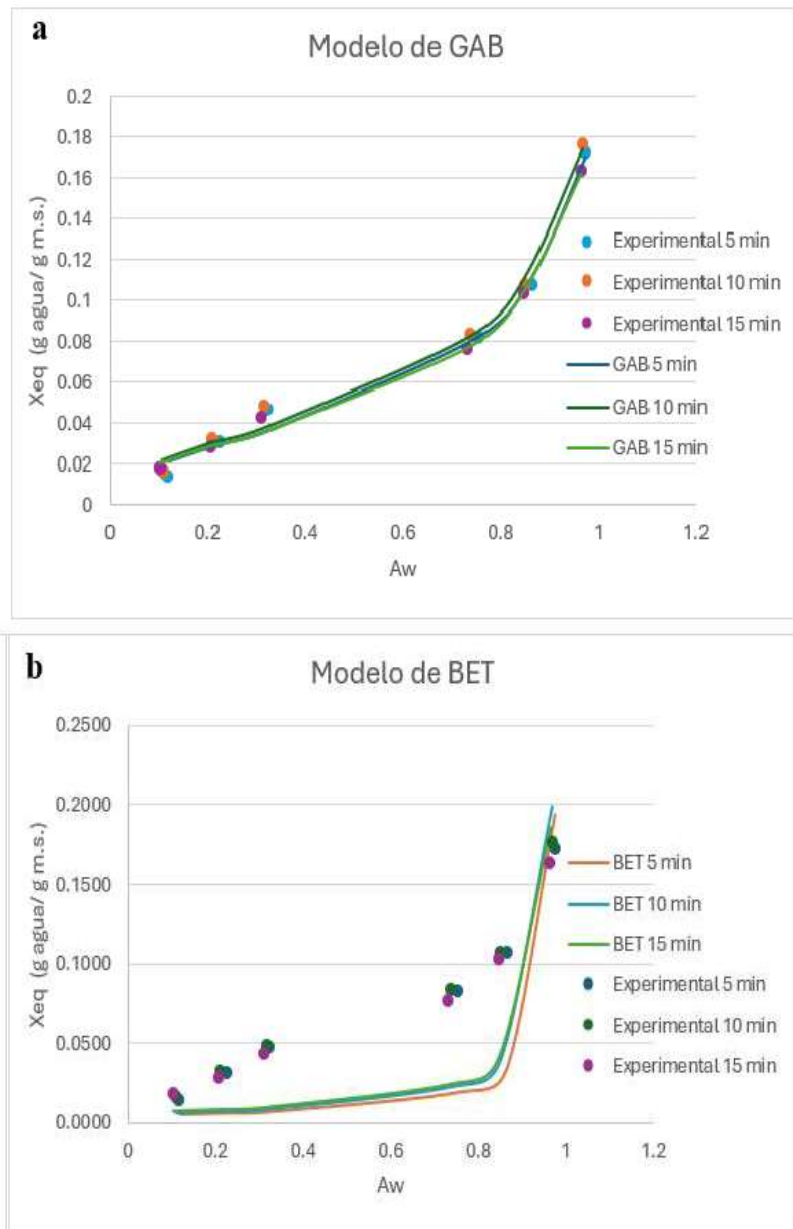


La Figura 8a muestra la isoterma de adsorción experimentales y modeladas con GAB de la harina de linaza con una granulometría de 250 micras para tres tiempos de tostado (5, 10 y 15 minutos) y en la Figura 7b se comparan los datos experimentales con los datos ajustados por el modelo BET para cada tiempo de tostado de la misma harina.

Claramente se observa una curva que se eleva rápidamente a medida que aumenta la actividad de agua, los datos experimentales y el modelo GAB coinciden muy bien, y a medida que aumenta el tiempo de tostado, la cantidad de agua adsorbida aumenta, lo que indica que la harina de linaza se vuelve más higroscópica con el tratamiento térmico, de la misma manera que para la harina de linaza de 500 micras el modelo de BET solo es ajustable para cierto rango de actividad de agua. Debido a las limitaciones fundamentales al aplicarse a productos altamente higroscópicos que no presentan un comportamiento lineal en actividades de agua por encima de 0.3 y menores a 0.6, el modelo de BET explica la adsorción multilaminar en sólidos homogéneos (Badui, 2006). El tiempo de tostado de 15 min muestra la menor humedad de equilibrio, mientras que el tiempo de tostado de 5 min muestra la mayor. Este comportamiento se observa también en el modelo de BET (Figura 7b). Es lo contrario a lo descrito para la harina de linaza de 500 micras, esta diferencia podría estar relacionada con el tamaño de partícula, partículas más pequeñas presentan mayor área superficial, incrementado el número de sitios activos disponibles para la adsorción de agua (Jiang et al., 2022). Una exposición a menor tiempo de tratamiento térmico puede preservar la estructura inicial del alimento como los grupos hidrofílicos con alta afinidad por el agua, permite que la harina tenga mayor humedad, mientras que un tostado de 15 minutos puede incurrir en la degradación de estos compuestos disminuyendo la capacidad de absorber agua (Bautista et al., 2007). Además el tostado por tiempos prolongados puede formar compuestos con menos afinidad por el agua como los productos de Maillard, que reducen la afinidad higroscópica (Hoseney, 1984).

Figura 9.

Isoterma de adsorción de la harina de linaza con granulometría de 125 micras y los tres tiempos de tostado, experimentales y modelo GAB



La figura 9 muestra que la harina de linaza es un material higroscópico que adsorbe agua rápidamente con el aumento de la actividad de agua, y que el tratamiento térmico aumenta su higroscopicidad, lo que puede afectar su estabilidad y calidad. El modelo GAB (Figura 9a) es preciso para describir la isoterma de adsorción, sugiriendo que la harina de linaza requiere

condiciones de almacenamiento y procesamiento controladas para mantener su calidad. Por su parte el modelo de BET (Figura 9b) muestra una curva que se eleva rápidamente a medida que aumenta la actividad de agua, los datos experimentales y el modelo BET coinciden razonablemente bien a bajas actividades de agua, siendo menos preciso que el modelo de GAB en la predicción de la humedad en equilibrio.

Por encima de 0.8 la adsorción de agua se intensifica en la harina de linaza, lo que puede provocar un aumento en la actividad enzimática y la interacción molecular entre el agua, carbohidratos y proteínas. según Ramírez (2011) es importante almacenar estos alimentos en ambientes con humedad relativa menor a 70%. Además, se observó que el tiempo de tostado afecta la isoterma de adsorción de humedad, ya que el calor aplicado durante el tostado provoca cambios estructurales y reduce la actividad de agua (Fukui et al., 2022). Esto se refleja en una isoterma ligeramente más baja a medida que el tiempo de tostado aumenta. los resultados muestran que 15 minutos de tostado presenta menor humedad en equilibrio en comparación con 5 minutos de tostado que muestra mayor valor respecto a la humedad en equilibrio. Esto se debe a que el aumento en el tratamiento térmico en este caso el tostado induce a modificaciones estructurales al desnaturalizar proteínas y la modificación de la fibra dietética lo cual aumenta su higroscopicidad, estas alteraciones pueden incrementar los sitios hidrofílicos en la matriz, lo cual aumenta la adsorción de agua a una misma actividad de agua (Bautista et al., 2007).

En todas las gráficas obtenidas se observa que las líneas (curvas) en el modelo Gab, se pegan a los puntos de datos experimentales a lo largo de todo el rango de A_w , lo que indica un R^2 alto, mostrando este modelo un mejor ajuste.

7.1.2. Determinación del valor de monocapa de GAB y BET

Tabla 4 *Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras*

Modelo	Constante	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.0174	0.0223	0.0257
	C	83.9093	264.4469	734499.4000
	K	0.9301	0.9084	0.8809
	R ²	0.9835	0.9858	0.9839
	%E	20.0898	14.4413	10.6749
Modelo de BET	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.005067	0.006592	0.007542
	C	878973.1	1024443	1047081
	R ²	0.7455	0.6574	0.5300
	%E	53.7489	55.5110	55.9473

La tabla 4 demuestra que el modelo de GAB tiene mejor ajuste (R² superior a 0.98) para describir la adsorción de agua en la harina de linaza tostada respecto al modelo de BET (R² menor a 0.74). Por tanto, se afirma que el modelo de GAB es el más adecuado para predecir la humedad en equilibrio de la harina de linaza tostada. En contraste, el modelo BET presenta una baja confiabilidad (%E mayor que 50%) para describir la adsorción de agua en todo el rango de actividad de agua; de igual manera, un valor alto de C (mayor que 878973.1) indica que el modelo presenta un sobreajuste a los datos experimentales. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas sobre harinas de girasol y linaza (Fernández et al., 2020).

Estos resultados son comparables a estudios realizados en otras harinas de semillas oleaginosas, harinas de semillas como la chía y el sésamo, donde el modelo GAB ha demostrado ser el más apropiado para describir la adsorción de agua debido a su capacidad de ajustarse en un amplio rango de Aw (Morales et al., 2019). Por el contrario, el modelo de BET

ha demostrado ser útil sólo para determinar X_m para $A_w < 0,5$, pero no para predecir la adsorción en humedades intermedias y altas (Pérez et al., 2018).

Claramente se observa que X_m se relaciona directamente con el tiempo de tostado, cuando el tiempo se prolonga mayor es el valor de monocapa, pasando de 0.0174 a 0.0257 g H_2O /g sólido en el modelo GAB y de 0.005067 a 0.007542 g H_2O /g sólido en el modelo BET. La relación entre la X_m y el tiempo de tostado refleja que con cada aumento de este último puede cambiar la estructura de la harina debido a un fuerte endurecimiento que produce mayor porosidad en la matriz y, por tanto, se puede beneficiar a mayor cantidad de agua retenida por la capa monomolecular.

El efecto del tostado sobre la adsorción de humedad es una variable clave a considerar. Mientras que algunos estudios han reportado que el tostado disminuye la capacidad de adsorción debido a la desnaturalización de proteínas y la reducción de porosidad (García et al., 2017), en este caso se observa un aumento en X_m , lo que sugiere que el tostado podría estar generando cambios en la estructura celular de la harina que favorecen la adsorción de agua.

Tabla 5

Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras

Modelo	Constante	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.0343	0.0285	0.0276
	C	13.8480	18.6271	21.2574
	K	0.8283	0.8625	0.8685
	R ²	0.9908	0.9806	0.9890
	%E	13.2438	20.0240	12.3082
Modelo de BET	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.004223	0.006489	0.007744
	C	1052034	1562687	747083
	R ²	0.1941	0.5055	0.5793
	%E	67.3211	54.4076	50.8597

La tabla 5 muestra que el modelo de GAB un ajuste significativamente superior ($R^2 > 0.98$) en comparación con el modelo de BET ($R^2 < 0.74$), lo que evidencia una mayor capacidad del modelo de GAB para describir el comportamiento de adsorción de agua en la harina de linaza tostada. Este resultado sugiere que el modelo de GAB representa con mayor precisión los fenómenos de adsorción multilaminar característico de los alimentos con alto contenido de compuestos higroscópicos. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas sobre harinas de girasol y linaza (Fernández et al., 2020).

Estos resultados son comparables a estudios realizados en otras harinas de semillas oleaginosas, harinas de semillas como la chía y el sésamo, donde el modelo GAB ha demostrado ser el más apropiado para describir la adsorción de agua debido a su capacidad de ajustarse en un amplio rango de A_w (Morales et al., 2019). Por el contrario, el modelo de BET

ha demostrado ser útil sólo para determinar X_m para $A_w < 0,5$, pero no para predecir la adsorción en humedades intermedias y altas (Pérez et al., 2018).

El incremento progresivo de la humedad monomolecular (X_m) con el tiempo de tostado (de 0.0174 a 0.0257 g H_2O /g sólido) sugiere una posible modificación estructural de la matriz del producto, generando una mayor cantidad de sitios activos para la adsorción de moléculas de agua. Este fenómeno puede estar asociado a cambios de la estructura de la harina debido a un fuerte endurecimiento que produce mayor porosidad en la matriz y mayor exposición de grupos polares hidrofílicos.

En contraste el modelo de BET mostró un ajuste deficiente, con valores de R^2 entre 0.53 y 0.75 y errores porcentuales superiores al 50 %. Estos resultados reflejan la baja capacidad de este modelo para describir sistemas donde la adsorción no se restringe a una única capa molecular. Asimismo, las constantes C extremadamente elevadas indican un sobreajuste numérico, probablemente debido a la heterogeneidad de las superficies generadas durante el tostado. Estos resultados coinciden con lo señalado por Pérez et al. (2018), quienes observaron que el modelo de BET tiende a perder validez a actividades de agua superiores a 0.45, rango en el cual el modelo de GAB ofrece una descripción más realista del fenómeno.

En conjunto, los resultados confirman que el modelo de GAB es el más adecuado para estimar la humedad de equilibrio en la harina de linaza tostada debido a que presenta mejores ajustes a los datos experimentales, por ello es utilizado con mayor frecuencia en diversos alimentos (Pérez, 2023).

Al comparar la harina de 250 micras con la harina de 500 micras se observa que esta presenta menor capacidad de adsorción estos resultados son consistentes con lo reportado por Muñoz et al. (2020) quienes analizaron el efecto de la reducción del tamaño de partícula en la adsorción de humedad en harinas de leguminosas y encontraron que a menor granulometría, la capacidad de adsorción disminuía debido a la compactación y menor porosidad, lo que sugiere

que la reducción del tamaño de partícula influye en la capacidad de adsorción, posiblemente debido a cambios en la estructura porosa y el modelo GAB sigue siendo el más adecuado para describir su comportamiento.

Tabla 6

Parámetros de los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras

Modelo	Constante	5 min	10 min	15 min
Modelo de GAB	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.0313	0.0324	0.0305
	C	14.1473	16.4255	17.4818
	K	0.8388	0.8418	0.8429
	R ²	0.9883	0.9900	0.9953
	%E	14.1680	11.7546	6.9722
Modelo de BET	Xm (g H ₂ O / g m.s)	0.004647	0.005983	0.006336
	C	807684.2	505121.6	2233013
	R ²	0.2948	0.3787	0.4210
	%E	64.1670	60.5889	58.8341

En la Tabla 6 se observa los resultados de los parámetros para la harina de linaza con granulometría de 125 micras, los cuales muestran que el modelo GAB sigue siendo el que mejor se ajusta a los datos experimentales, con valores de R² superiores a 0.98 y errores relativos menores al 15%, lo que indica una buena capacidad predictiva. A diferencia de los resultados con harinas de 250 y 500 micras, se observa una ligera variación en la capacidad de adsorción de agua (valor de monocapa), que no sigue una tendencia clara con la disminución del tamaño de partícula, lo que sugiere que otros factores, como la distribución de poros y la compactación, pueden estar influyendo.

Por otro lado, el modelo BET sigue mostrando un ajuste deficiente (R^2 menor a 0.5) y errores elevados (superiores al 58%), lo que reafirma su menor aplicabilidad en el rango de actividad de agua estudiado. Además, el parámetro C varía significativamente, lo que indica inestabilidad en la representación de la energía de adsorción.

En comparación con estudios previos, como el de Muñoz et al. (2020) sobre harinas de leguminosas, se confirma que la disminución de tamaño de partícula puede afectar la capacidad de adsorción de agua debido a la compactación y reducción de la accesibilidad a los sitios activos de adsorción. Sin embargo, el comportamiento de la harina de linaza parece estar influenciado también por la naturaleza de sus compuestos bioactivos, como mucílagos y lípidos, que pueden modificar la interacción con el agua.

Los valores obtenidos para el valor de monocapa GAB de todos los tratamientos están por debajo del valor que reportó Salinas (2024) para harina de linaza almacenada a diferentes temperaturas 0.0448 y 0.0503 g H₂O/ g m.s. Esta diferencia se podría explicar debido a que la harina de linaza que se utilizó en el estudio anterior fue de semillas crudas, y al someter a estas semillas a procesos térmicos como el tostado provoca cambios estructurales y reduce la actividad de agua (Fukui et al., 2022).

7.1.3. Análisis estadístico

Tabla 7

Análisis de varianza para el valor de monocapa GAB de la harina de linaza en función de la granulometría y tiempo de tostado.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Tiempo de tostado	0.00000113752	1	0.00000113752	0.11	0.7638
B: granulometría (micras)	0.00013824	1	0.00013824	13.16	0.0361
AA	8.88889E-9	1	8.88889E-9	0.00	0.9786
AB	0.0000314519	1	0.0000314519	2.99	0.1820
BB	0.00000720857	1	0.00000720857	0.69	0.4682
Error total	0.0000315192	3	0.0000105064		
Total (corr.)	0.000226296	8			

R-cuadrada = 86.0717 por ciento

La tabla 7 nos muestra la fuente de variación más importante es la granulometría (B), que explica el 86,07% de la variabilidad en el valor de monocapa GAB el cual se convierte en el factor más importante que afecta el valor de monocapa GAB de la harina de linaza. El tiempo de tostado (A) no tiene un efecto significativo en el valor de monocapa GAB ($p = 0,7638$). La interacción entre la granulometría y el tiempo de tostado (AB) no es significativa ($p = 0,1820$). La interacción entre la granulometría y la granulometría (BB) no es significativa ($p = 0,4682$).

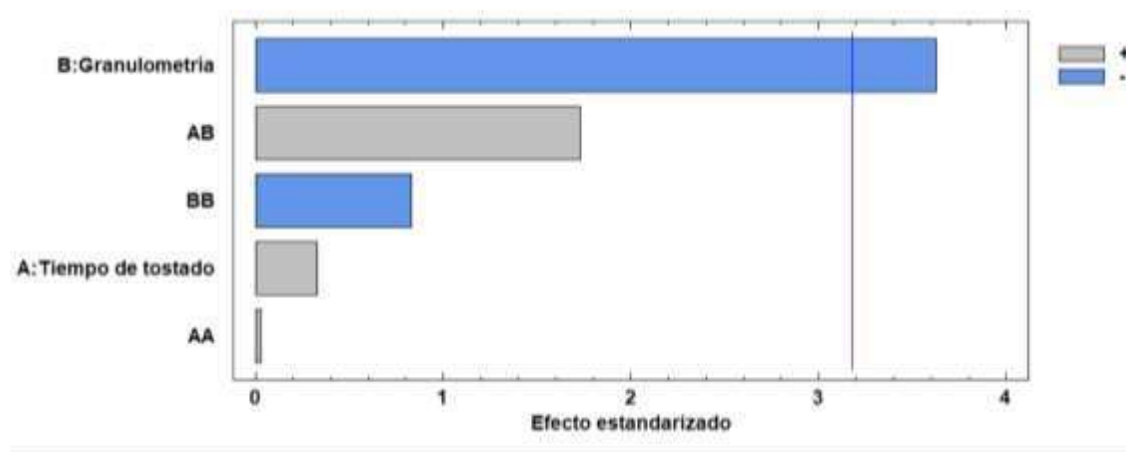
La tabla 7 ANOVA muestra que la granulometría es el factor que produce efectos significativos en el contenido de agua de monocapa de GAB, con un valor de $p < 0,05$. Esto coincide con los resultados reportados por Matos y Rajo (2010), quienes indican que la granulometría aumenta el número de sitios activos disponibles para absorber agua,

especialmente en la capa monomolecular, debido a la mayor heterogeneidad en el tamaño de las partículas.

El tamaño de partícula de la harina influye en la absorción de agua y el valor de monocapa. Partículas más finas producen mayor superficie específica de adsorción, facilitando una absorción más rápida y uniforme (Matos y Rajo, 2010). Sin embargo, partículas extremadamente finas pueden aglomerarse, reduciendo la superficie efectiva disponible para la adsorción (Puma, 2017). La molienda fina puede exponer grupos funcionales hidrofílicos, aumentando la afinidad por las moléculas de agua (Carhuamaca, 2013). Conocer el valor de monocapa es importante para predecir la vida útil de los alimentos y diseñar estrategias de conservación (Ovalle, 2015).

Figura 10.

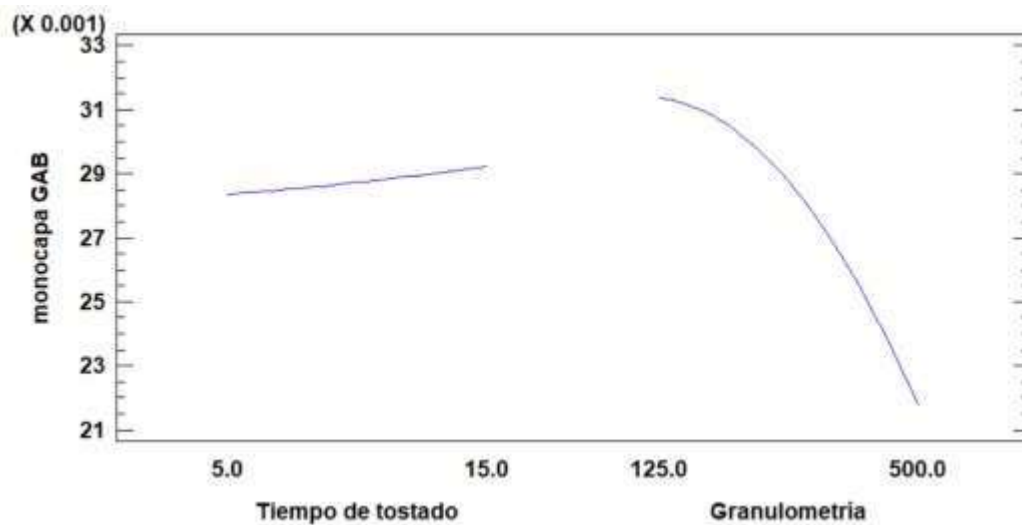
Diagrama de Pareto para el valor de monocapa GAB



El diagrama de Pareto representa los efectos estandarizados a un nivel de 0.05 en esta figura podemos apreciar que los efectos de la granulometría sobrepasan la línea azul, esto indica que el efecto lineal de este factor es estadísticamente significativo, lo que señala que el factor mencionado ejerce influencia en el contenido de agua del valor de monocapa (fue el factor más importante) cuando la granulometría aumenta (partículas más grandes) va a disminuir el valor de agua de monocapa de GAB.

Figura 11.

Efectos principales para el valor de monocapa de GAB



La figura 11 muestra los efectos principales de los factores en estudio (tiempo de tostado y granulometría) de manera independiente, donde se observa que el tiempo de tostado no tiene cambios ya que los valores de monocapa se mantienen casi constantes, por tanto, no hay diferencias estadísticas, mientras que los efectos de la granulometría tienen un comportamiento inverso ya que cuando la granulometría es mayor 500 micras el contenido de agua de monocapa es menor.

Tabla 8

Análisis de varianza para el valor de monocapa BET de la harina de linaza en función de la granulometría y tiempo de tostado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo de tostado	0.0000096094 9	1	0.0000096094 9	35.30	0.0095
B: granulometría (micras)	8.81667E-7	1	8.81667E-7	3.24	0.1697
AA	4.35556E-7	1	4.35556E-7	1.60	0.2952
AB	3.44048E-8	1	3.44048E-8	0.13	0.7457
BB	1.15238E-7	1	1.15238E-7	0.42	0.5617
Error total	8.16706E-7	3	2.72235E-7		
Total (corr.)	0.0000118222	8			

R-cuadrada = 93.0918 por ciento

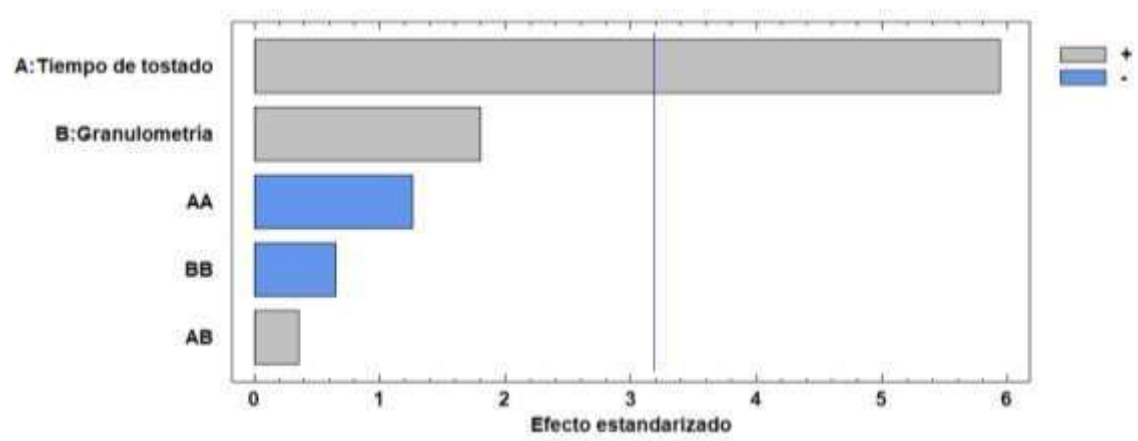
La tabla 8 muestra que el tiempo de tostado es la fuente de variación más significativa en el valor de monocapa BET de la harina de linaza, con un efecto significativo y un valor de p de 0,0095. La granulometría y sus interacciones no tienen un efecto significativo. El modelo de regresión explica el 93,09% de la variabilidad en el valor de monocapa BET, lo que sugiere que el modelo es adecuado para predecir el valor de monocapa BET en función del tiempo de tostado.

En la tabla 8 el análisis ANOVA reveló que el tiempo de tostado es un factor significativo que afecta el contenido de agua de monocapa de BET en la harina de linaza. Según Ruiz (2024), el tostado puede desnaturalizar proteínas y modificar polisacáridos, alterando los sitios activos disponibles para la adsorción de agua. Sin embargo, en este estudio, se observó un aumento en el valor de monocapa de BET con el aumento del tiempo de tostado, lo que sugiere que el calor puede reestructurar o desnaturalizar moléculas, exponiendo nuevos grupos

funcionales hidrofílicos y aumentando la capacidad de adsorción de agua, según Labuza y Altunakar (2007).

Figura 12.

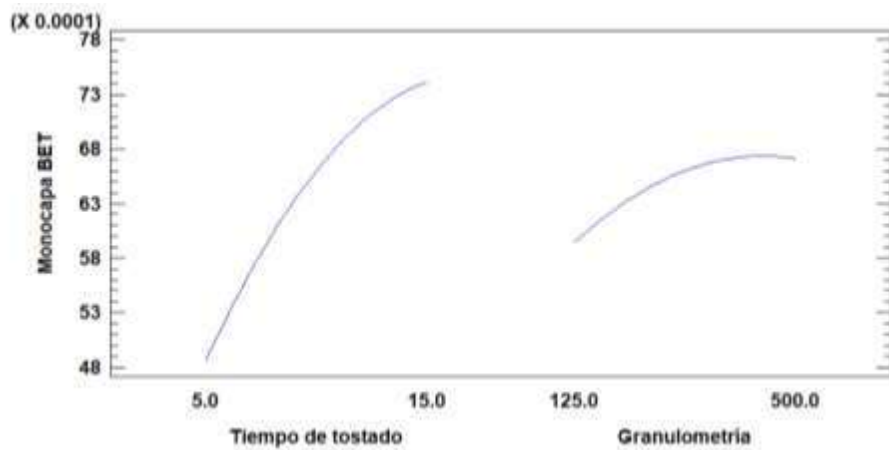
Diagrama de Pareto para el valor de monocapa de BET



El diagrama de Pareto (Figura 12) representa los efectos estandarizados a un nivel de 0.05 en esta figura podemos apreciar que los efectos del tiempo de tostado sobrepasan la línea azul, esto indica que el efecto lineal de este factor es estadísticamente significativo, lo que señala que el factor mencionado ejerce influencia en el contenido de agua del valor de monocapa (fue el factor más importante) a mayor tiempo de tostado va a ver un mayor valor de agua de monocapa de BET.

Figura 13.

Efectos principales para el valor de monocapa de BET



La figura 13 muestra los efectos principales de los factores en estudio (tiempo de tostado y granulometría) de manera independiente, donde se observa que el nivel más alto (15 min) de tiempo de tostado produce mayor contenido de agua de monocapa de BET en las muestras, es decir tiene una relación directa ya que esta aumenta a medida que el tiempo de tostado se incrementa, mientras que la granulometría tiene promedios de agua de monocapa muy cercanas a lo largo del intervalo de 125 a 500 micras, siendo la granulometría de 500 micras la que produce mayor contenido de agua de monocapa.

VIII. CONCLUSIONES

- El comportamiento de la linaza en cuanto al contenido de agua de monocapa varía significativamente con el tiempo de tostado, aumenta el contenido de agua de monocapa de GAB y de BET de 0.0174 a 0.0257 y de 0.0046 a 0.0077 g agua/100 g ms a medida que el tiempo de tostado aumenta de 5 a 15 minutos. Este comportamiento se debe posiblemente a la exposición térmica prolongada que provoca cambios estructurales como el endurecimiento que produce mayor porosidad favoreciendo la mayor retención de agua de monocapa.
- La granulometría afectó significativamente el contenido de agua de monocapa de GAB de la harina de linaza tostada, presentando un menor valor para la granulometría más gruesa de 500 micras (0.0174 g agua/100 g ms) y el mayor valor es para 250 micras (0.0343 g agua/100 g ms), este mismo comportamiento se observa en el valor de monocapa de BET 500 micras (0.0046 g agua/100 g ms) y 250 micras (0.0077 g agua/100 g ms). Probablemente debido a la distribución de los poros y la compactación limitando la adsorción de humedad
- Las isothermas de adsorción experimentales y modeladas son de tipo II, de forma sigmoidea, lo cual demuestra que se trata de un proceso de adsorción física en multicapas. Los valores de humedad de monocapa estimados mediante los modelos de GAB y BET están entre 0.0174 – 0.0343 y 0.0046 – 0.0077 g de agua/g de materia seca, respectivamente. El modelo de GAB fue el que mejor se ajustó al comportamiento de la harina de linaza tostada a largo de todo el rango de actividad de agua: $R^2 > 0,98$.

IX. RECOMEDACIONES

- Considerar la variación de la temperatura del proceso de tostado, ya que no solo el tiempo, sino también la temperatura puede influir en la adsorción de agua.
- Complementar el estudio con análisis de composición química, como contenido de proteínas, grasas y fibra, ya que estos factores también pueden influir en la capacidad de adsorción de agua.
- Determinar cómo la granulometría y el tiempo de tostado influyen en la estabilidad del producto durante el almacenamiento a diferentes condiciones de humedad relativa.
- Utilizar la harina de linaza como materia prima en producción de alimentos a escala industrial, una opción es la pastelería, tomando en cuenta el estudio de la vida útil de cada producto, ofreciendo pastelería saludable; y así contribuiríamos con la nutrición y cuidado de la salud del consumidor a corto y largo plazo, ofreciendo pasteles, tortas, bocaditos que sean saludables para ocasiones especiales o simplemente para el día a día, o como lonchera para nuestro niños, sin ninguna culpa.

X. BIBLIOGRAFIA

- Aldave Palacios, G. J. (2016). Efectos de la temperatura y tiempo de tostado en los caracteres sensoriales y en las propiedades químicas de granos de cacao procedente de Uchiza, San Martín. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Marcos. Perú*, 115.
- Allca Ayala, V. (2022). Isotherma de adsorción, propiedades funcionales y vida útil de la harina de chuño blanco de papa andina ccompis (*Solanum tuberosum*) proveniente de la Comunidad de Mollocco – Antabamba. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. Perú*.
http://190.119.174.92/bitstream/handle/UNAMBA/1138/T_767.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alvarado-Yupanqui, L., Miano, A. C., & Barraza-Jáuregui, G. (2020). Sorption isotherm and shelf life of malted quinoa flour. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, July 2020*, 27–31.
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.138>
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos* (PEARSON (ed.); Cuarta Edición).
- Baquerizo, A. J. (2023). Modelado de la cinética de secado e isothermas de adsorción de agua de oca amailla (*Oxalis tuberosa* variedad amarilla) y oca roja (*Oxalis tuberosa* variedad roja). In *Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Abato, Ecuador*.
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%20LUCINEIA%20CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proces>
- Basilio, J. (2015). Predicción de la vida útil de chifles de plátanos (*Musa paradisiaca*) mediante modelos matemáticos. *Tesis de Posgrado. Universidad Nacional Agraria La*

- Molina. Perú*, 112. <http://190.119.243.88/bitstream/handle/UNALM/1863/J11.B3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bautista Justo, M., Castro Alfaro, A. D., Camarena Aguilar, E., Wrobel, K., Wrobel, K., Guzmán, G. A., Sierra, Z. G., & Zanella, V. D. M. (2007). Desarrollo de pan integral con soya, chía, linaza y ácido fólico como alimento funcional para la mujer. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 57(1).
- Bonilla, A. I., Usaga, J., Cortés, C., & Pérez, A. M. (2024). Effect of thermal treatment on selected bioactive compounds and physicochemical properties of a blackberry-soy-flaxseed beverage. *NFS Journal*, 35(March), 12–15.
<https://doi.org/10.1016/j.nfs.2024.100177>
- Carl Hoseney, R. (1984). Chemical changes in carbohydrates produced by thermal processing. *Journal of Chemical Education*, 61(4), 308–312.
<https://doi.org/10.1021/ed061p308>
- Caruajulca Vargas, L. E. (2019). Vida Útil de harina de tres variedades de arveja, (*Pisum sativum* L.) sometidas a tres tiempos diferentes de tostado. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca*.
Pefile:///C:/Users/Lili_OneDrive/Documentos/LILI/Maestria/CICLO III/TESIS II/Nunes2020.Pdf *frú*, 91.
- Edel, A., & Rosell, C. (2007). *De Tales Harinas, Tales Panes* (1a ed).
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/20246>
- Fennema, O., & Tannenbaum, S. (1996). Introducción a la química de los alimentos. *University of Wisconsin*, 1249.
<https://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/4808/3059>
- Figuerola, F., Muñoz, O., & Estévez, A. (2008). La Linaza como fuente de compuestos Bioactivos. *Agro Sur*, 36(2), 49–58.

- Fukui, M., Islam, M. Z., Lai, H. M., Kitamura, Y., & Kokawa, M. (2022). Effects of roasting on storage degradability and processing suitability of brown rice powder. *Lwt*, 161(February), 113277. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113277>
- García, F. A. (2021). Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de Tocosh de papa (*Solanum tuberosum*) mediante la isoterma de GAB. *Tesis de Pregado. Universidad Nacional de Trujillo. Perú*, 71.
<http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/13383/Solano Rodriguez%2C Edgar Ivan.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2Th5ttrMog-9jLUPMMnjofbpsL2L9ZMlzgrRamDxX4V4J4UCgARDCvOFc>
- Jiang, C., Wang, R., Liu, X., Wang, J., Zheng, X., & Zuo, F. (2022). Effect of Particle Size on Physicochemical Properties and in vitro Hypoglycemic Ability of Insoluble Dietary Fiber From Corn Bran. *Frontiers in Nutrition*, 9(July), 1–10.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.951821>
- Kajla Assistant Professor, P., Sharma Professor, A., Kajla, P., & Sharma, A. (2020). Storage stability of processed flaxseed powder. ~ 100 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(2), 100–104. www.phytojournal.com
- Kauser, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Javaria, S., Ul, Z., Kabir, K., Yaqub, S., & Akram, S. (2024). Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological; characteristics and functional food applications. *Food Chemistry Advances*, 4(June 2023), 100573. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573>
- Lares, M. del C., Gutiérrez, R., Pérez, E., & Álvarez, C. (2012). Efecto del tostado sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas, composición proximal y perfil de ácidos grasos de la manteca de granos de cacao del estado Miranda, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(2), 439–446.
- León, A. E. (2020). ¿exportar trigo o harina? un análisis desde el punto de vista de la calidad.

Universidad Nacional de Córdoba, 8(2), 52–56.

Liu, S. X., Chen, D., & Xu, J. (2022). Physiochemical properties of jet-cooked amaranth and improved rheological properties by processed oat bran. *Future Foods*, 5(July 2021), 100107. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100107>

Magro Porras, M. A. (2015). Caracterización fisicoquímica , química apartir de la semilla germinada de linaza (*Linum usitatissimum*) mediante autoclavado y tostado. *Tesis de Pregado. Universidad Nacional Del Centro Del Perú. Perú*, 125.
[http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1296/tesis harina 2.pdf?sequence=1&isAllowed=y%250Achrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%253A%252F%252Frepositorio.uncp.edu.pe%252Fbitstream%252Fhandle%252F20.500](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1296/tesis%20harina%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y%250Achrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%253A%252F%252Frepositorio.uncp.edu.pe%252Fbitstream%252Fhandle%252F20.500).

Ostojich Cuevas, Z., & Sangronis, E. (2012). Caracterización de semillas de linaza (*Linum usitatissimum* L.) cultivadas en Venezuela. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 62(2), 192–200.

Pacheco-Coello, F., Torres, R., Arvelo, T., & Velasquez, I. (2020). Variación de la actividad antioxidante por efecto del tostado en granos de café (*Coffea arabica*), estado Miranda, Venezuela. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 3(2), 49–56.
<https://doi.org/10.22206/cac.2020.v3i2.pp49-56>

Pérez Malca, A. (2023). Efecto de la temperatura en las isoterms de adsorción de harina de cañihua. *Tesis de Pregrado, Univerdidad Nacional de Trujillo. Perú*, 101.

Pianesso, D., Adorian, T. J., Mombach, P. I., Dalcin, M. O., Loebens, L., Telles, Y. B., Roballo, S. S., Lovatto, N. M., & Silva, L. P. (2020). Nutritional assessment of linseed meal (*Linum usitatissimum* L.) protein concentrate in feed of silver catfish. *Animal Feed Science and Technology*, 265(May 2018), 114517.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114517>

- Polo, J. V. (2023). Efecto de la Temperatura en el valor de Monocapa y Calor Isotérico en Harina de Jengibre (*Zingiber officinale*) mediante la isoterma GAB. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Trujillo. Perú.*
- Puma Araujo, A. S. (2017). Caracterización de flujos de harina de trigo (*Triticum aestivum*) de cada pasaje de molienda en “Molinos e Industrias. *Trabajo de Pregrado, Técnica de Ambato. Ecuador*, 5(1), 1–8.
<https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298>
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005>
<http://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58>
<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>
- Ramírez Miranda, M., Cruz y Victoria, M. T., Vizcarra Mendoza, M. G., & Anaya Sosa, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de Harina de Maíz Nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), 165–178. www.rmiq.org
- Rodríguez, J. O. (2015). Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) en hojuelas Effect. *Universida Nacional De Trujillo*, 36.
[https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández Chávarry%2C Karla Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández%20Chávarry%20Karla%20Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rubio Mero, C. B. (2020). Aplicación de la masa madre de cultivo con tres tipos de harinas(maíz,morocho y garbanzo)para la elaboración de panes en la ciudad de Guayaquil. *Universidad de Guayaquil*, 1–107.
<https://secure.arkund.com/view/77480179-386149-959952>
- Rubira Martínez, J. (2018). Efecto de la humedad relativa y del almacenamiento en los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante de un producto extruído de harina de maíz y chontaduro (*Bactris gasipaes* H.B.K). *Tesis de Pregrado, Universidad*

Politécnica de Valencia. España, 37.

- Saleh, A. A., Nahla, A., Amber, K., Badawi, N., Aboelenin, S. M., Alzawqari, M. H., Albogami, S., Abdel-Moneim, A. M. E., Soliman, M. M., & Shukry, M. (2022). Effect of dietary incorporation of peanut and linseed meals with or without enzyme mixture on physiological performance of broilers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(6), 103291. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103291>
- Salinas Anticona, L. T. (2024). Efecto de la temperatura sobre los parámetros termodinámicos de la isoterma de GAB y calor isostérico en harina de linaza (*Linum usitatissimum*). *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional De Trujillo. Perú.* [https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández Chávarry%2C Karla Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17049/Hernández%20Karla%20Yajaira.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Shen, Y., Hong, S., & Li, Y. (2022). Chapter Three - Pea protein composition, functionality, modification, and food applications: A review. *Advances in Food and Nutrition Research*, 101, 71–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.02.002>.
- Shi, Y., Wang, L., Fang, Y., Wang, H., Tao, H., Pei, F., Li, P., Xu, B., & Hu, Q. (2018). A comprehensive analysis of aroma compounds and microstructure changes in brown rice during roasting process. *Lwt*, 98(March), 613–621. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.018>
- Talens Oliag, P. (2020). Sorción De Agua Un Alimento. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–8. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens - Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens%20Determinaci%C3%B3n%20de%20la%20isoterma%20de%20sorcici%C3%B3n%20de%20agua%20un%20alimento.pdf?sequence=1)
- Torres Ruiz, J. M. (2023). Propuesta de una barra de chocolate con linaza y concentrado de proteína de soya adicionada con quínoa inflada. *Tesis de Pregado. Universidad Autonoma de Mexico. Mexico.*

- Yachachin Espinoza, S. L. (2013). Caracterización fisicoquímica del extracto espectorante de Ajo (*Allium sativum* L.), Kion (*Zingiber officinale* L.), Eucalipto (*Eucaliptus globulus* L.) y Linaza (*Linum usitatissimum* L.). *Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Del Perú. Perú*, 10–11.
- Youn, K. S., & Chung, H. S. (2012). Optimization of the roasting temperature and time for preparation of coffee-like maize beverage using the response surface methodology. *Lwt*, 46(1), 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.014>
- Yupanqui Calle, Y. J. (2023). Predicción de vida útil de harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a partir de isoterma de adsorción de agua para diferentes modelos matemáticos. *Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga. Perú*. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5198>

XI.

XII. ANEXOS

Anexo 1. Datos experimentales

Tamizado 500 micras					
5 min		10 min		15 min	
Wa	Xeq (g H2O/g m.s)	Wa	Xeq (g H2O/g m.s)	Wa	Xeq (g H2O/g m.s)
0.118	0.01	0.112	0.018	0.108	0.025
0.226	0.025	0.215	0.031	0.211	0.036
0.328	0.04	0.32	0.045	0.316	0.048
0.758	0.056	0.751	0.065	0.747	0.071
0.879	0.091	0.86	0.1	0.857	0.100
0.975	0.187	0.968	0.186	0.961	0.170
Tamizado 250 micras					
0.112	0.015	0.111	0.012	0.106	0.015
0.233	0.035	0.227	0.033	0.224	0.03
0.33	0.049	0.328	0.047	0.324	0.045
0.755	0.087	0.749	0.08	0.745	0.074
0.865	0.113	0.869	0.103	0.852	0.101
0.979	0.18	0.967	0.173	0.959	0.165
Tamizado 150 micras					
0.119	0.014	0.11	0.016	0.104	0.018
0.226	0.031	0.212	0.032	0.208	0.028
0.325	0.047	0.318	0.048	0.311	0.043
0.756	0.082	0.74	0.083	0.734	0.076
0.867	0.107	0.853	0.107	0.849	0.103
0.976	0.172	0.97	0.176	0.966	0.163

Anexo 2. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 500 micras.

Tamizado 500 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.118	0.01	0.0178	0.0057	0.112	0.018	0.0241	0.0074	0.108	0.025	0.0285	0.0085
0.226	0.025	0.0210	0.0065	0.215	0.031	0.0273	0.0084	0.211	0.036	0.0316	0.0096
0.328	0.04	0.0243	0.0075	0.32	0.045	0.0312	0.0097	0.316	0.048	0.0357	0.0110
0.758	0.056	0.0585	0.0209	0.751	0.065	0.0702	0.0265	0.747	0.071	0.0753	0.0298
0.879	0.091	0.0949	0.0419	0.86	0.1	0.1020	0.0471	0.857	0.100	0.1051	0.0527
0.975	0.187	0.1860	0.2027	0.968	0.186	0.1850	0.2060	0.961	0.170	0.1678	0.1934

Anexo 3. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 250 micras.

Tamizado 250 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.112	0.015	0.0221	0.0048	0.111	0.012	0.0209	0.0073	0.106	0.015	0.0208	0.0087
0.233	0.035	0.0326	0.0055	0.227	0.033	0.0291	0.0084	0.224	0.03	0.0287	0.0100
0.33	0.049	0.0396	0.0063	0.328	0.047	0.0350	0.0097	0.324	0.045	0.0343	0.0115
0.755	0.087	0.0877	0.0172	0.749	0.08	0.0783	0.0259	0.745	0.074	0.0762	0.0304
0.865	0.113	0.1176	0.0313	0.869	0.103	0.1118	0.0495	0.852	0.101	0.1044	0.0523
0.979	0.18	0.1783	0.2011	0.967	0.173	0.1700	0.1966	0.959	0.165	0.1636	0.1889

Anexo 4. Determinación de la humedad de equilibrio experimental y con los modelos GAB y BET (g H₂O/g sólido) para los tres tiempos de tostado de la harina de linaza de 125 micras.

Tamizado 125 micras											
5 min				10 min				15 min			
Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET	Wa	Xeq	Xbs, GAB	Xbs, BET
0.119	0.014	0.0213	0.0053	0.016	0.0224	0.016	0.0067	0.018	0.0210	0.018	0.0071
0.226	0.031	0.0297	0.0060	0.032	0.0308	0.032	0.0076	0.028	0.0292	0.028	0.0080
0.325	0.047	0.0363	0.0069	0.048	0.0379	0.048	0.0088	0.043	0.0356	0.043	0.0092
0.756	0.082	0.0823	0.0190	0.083	0.0829	0.083	0.0230	0.076	0.0773	0.076	0.0238
0.867	0.107	0.1120	0.0349	0.107	0.1123	0.107	0.0407	0.103	0.1049	0.103	0.0420
0.976	0.172	0.1702	0.1936	0.176	0.1743	0.176	0.1994	0.163	0.1622	0.163	0.1864

Anexo 5. Panel fotográfico



Recepción de linaza



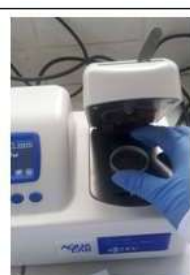
Tostado de la linaza



Harina de linaza



Soluciones acuosas de sales acondicionadas para el experimento



Análisis de la actividad de agua



Lectura de la actividad de agua

Anexo 6. Pasos en statistica para obtener el valor monocapa

Ingresar los datos experimentales en la hoja de trabajo

1. Preparar una hoja con dos columnas una que contenga la A_w experimental y la otra columna con x_{eq} (humedad en equilibrio) experimental.
2. Abrir la pestaña statistics, luego Advans Models, posteriormente Nolinear Estimation y hacer click en User-specified regression. Custom los function, en el recuadro escribir el modelo GAB y BET y oprimir el botón ok.
3. Definir variable dependiente (X_{eq}) e independiente (A_w).
4. Definir los parámetros de estimación (x_m , c y k) para GAB y (x_m y c) para BET.
5. Oprimir el botón summary y finalmente dar lectura los parámetros obtenidos.
6. En Microsoft Office Excel, 2016 se reemplazó los parámetros en las ecuaciones 1 y 2 para obtener la X_{eq} de GAB y de BET.
7. Las isothermas de GAB y de BET se construyeron insertando un gráfico de dispersión, se selecciono para el eje X la A_w y para el eje Y la X_{eq} .
8. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E) calculados según las ecuaciones (3) y (4).

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (c - 1) \cdot a_w)} \dots \dots \dots \text{BET (1)}$$

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 + (c - 1) \cdot K \cdot a_w)} \dots \dots \dots \text{GAB (2)}$$

$$R^2 = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{(\sum Y - \bar{Y})^2} \dots \dots \dots (3)$$

$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \dots \dots \dots (4)$$