UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Modelado de la cinética de secado e isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previa a la obtención de Título de Ingeniero en Alimentos, otorgados por la Universidad Técnica de Ambato, a través de La Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Marco Sebastian Castillo Salazar

Tutor: Mg. María Eugenia García Pazmiño

Ambato – Ecuador

Agosto – 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

Mg. María Eugenia García Pazmiño

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamente de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 27 de junio del 2024



Mg. María Eugenia García Pazmiño

2100248505

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marco Sebastian Castillo Salazar, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de Ingeniero en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Marco Sebastian Castillo Salazar

1805374038

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, como documento disponible para su lectura, proceso de integración, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y realice respetando mis derechos de autor.



Marco Sebastian Castillo Salazar

1805374038

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para consistencia firman:

Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO CASADO ROJO

Presidente del Tribunal

Firmado electrónicamente por:
FREDDY GEOVANNY DEL POZO LEON

Dr. Freddy Geovanny del Pozo León

1802446276

Firmado electrónicamente por:
CARLOS SANTIAGO MORENO MIRANDA

Dr. Carlos Santiago Moreno Miranda

1804285342

Ambato, 01 de agosto del 2024

DEDICATORIA

A mis padres Carlos Castillo y Alicia Salazar que han sido el apoyo constante en este trayecto académico. A mis hermanos David Salazar y Alex Castillo que han estado pendiente de mis estudios además del apoyo moral brindado.

A mis abuelos paternos, David Benítez y Gladys Merino, mis abuelos maternos, Sergio Salazar (+) y Gladys Paredes (+), que han estado incondicionalmente, además de la fuerza de voluntad brindada y toda la preocupación que han puesto en mi para lograr mis objetivos.

AGREDECIMIENTO

Agradezco a mi tutora Mg. María Eugenia García Pazmiño por brindarme el apoyo moral y académico al ser una guía en este trabajo de titulación.

A la Ing. Liliana Acurio, por su guía académica y el apoyo brindado.

A todos mis maestros que formaron parte de mi trayectoria académica.

A la Universidad Técnica de Ambato – Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología – Carrera de Alimentos.

Familiares y amigos.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR ii

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii

DERECHOS DE AUTOR iv

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v

DEDICATORIA vi

AGREDECIMIENTO vii

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS viii

ÍNDICE DE TABLAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xii

RESUMEN EJECUTIVO xiii

ABSTRACT xiv

CAPÍTULO I 1

1. MARCO TEÓRICO 1

1.1 Antecedentes investigativos 1

1.1.1 Justificación 1

1.1.2 Nuevas fuentes de alimentos 2

1.1.3 Lenteja de agua (*Lemna minor*) 2

1.1.4 Proteína en la Lenteja de agua (*Lemna minor*) 2

1.1.5 Propiedades nutricionales de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) 3

1.1.6 Cinética de secado 4

1.1.7 Modelamiento matemático de la cinética de secado 5

1.1.8 Isotermas de adsorción 6

1.2 Objetivos 7

1.2.1 Objetivo general 7

1.2.2 Objetivos específicos 7

CAPÍTULO II 8

2. METODOLOGÍA 8

2.1 Materiales 8

2.2 Métodos 9

2.2.1 Construir la curvatura de cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) a 60 °C. 9

2.2.1.1 Materia prima 9

2.2.1.2 Humedad 9

2.2.1.3 Equipo de secado 9

2.2.1.4 Adecuación para el secado 9

2.2.1.5 Secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) 10

2.2.1.6 Obtención de la curva de cinética de secado 10

2.2.2 Establecer la isoterma de adsorción de la harina de la Lenteja de agua (*Lemna minor*). 10

2.2.2.1 Adecuación para las isotermas de adsorción 10

2.2.2.2 Obtención de la curva de la isoterma de adsorción 11

2.2.3 Ajustar los datos experimentales de la cinética de secado a modelos matemáticos referenciales. 11

2.2.4 Ajustar los datos experimentales de la isoterma de adsorción a modelos matemáticos referenciales 12

CAPÍTULO III 14

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 14

3.1 Análisis y discusión de resultados 14

3.1.1 Curvas y modelamiento de la cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) 14

3.1.1.1 Curva de velocidad de secado 15

3.1.1.2 Curvas de la cinética de secado 16

3.1.2 Curva de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) 23

CAPÍTULO IV 28

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 28

4.1 Conclusiones 28

4.2 Recomendaciones 29

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición proximal de los tipos de Lenteja de agua en base en peso seco 3

Tabla 2. Comparación de presencia de aminoácidos esenciales entre especies de Lenteja de agua (g/100 g de proteína) 4

Tabla 3. Modelos matemáticos para la cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)..... 5

Tabla 4. Ecuaciones para el modelado matemático de las isotermas de adsorción 6

Tabla 5. Equipos..... 8

Tabla 6. Recursos materiales 8

Tabla 7. Sales saturadas como factor higroscópico para las isotermas de adsorción 10

Tabla 8. Modelos y parámetros obtenidos en el ajuste de los datos en las ecuaciones de cinética de secado 22

Tabla 9. Modelos matemáticos con sus respectivas constantes remplazadas 23

Tabla 10. Parámetros obtenidos del modelo de GAB y BET del modelado de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)..... 25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Isoterma de sorción común de una matriz..... 6

Figura 2. Curva experimental de secado de la Lenteja de agua (Lemna minor). 14

Figura 3. Curva de velocidad de secado de la Lenteja de agua (Lemna minor). 16

Figura 4. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Newton. 17

Figura 5. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Henderson y Pabis. 18

Figura 6. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Page. 19

Figura 7. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Page modificado. 20

Figura 8. Ajuste de la cinética de secado al modelo Logarítmico. 21

Figura 9. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Thomson. 22

Figura 10. Curva experimental de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (Lemna minor). .. 24

Figura 11. Ajuste de la isoterma de adsorción al modelo de GAB. 26

Figura 12. Ajuste de la isoterma de adsorción al modelo de BET. 27

RESUMEN EJECUTIVO

La necesidad de obtener nuevas fuentes de alimentos a lo largo del tiempo ha sido fundamental para el desarrollo y sostenibilidad de la humanidad; en la actualidad, la tendencia por el consumo de alimentos funcionales y nutritivos ha abierto una línea de investigación en la industria alimentaria. En este contexto, nos interesamos en la Lenteja de agua (*Lemna minor*) que posee propiedades nutricionales específicamente en su alto contenido de proteína, motivo por el cual en los últimos se ha convertido en fuente de interés. La investigación centra en la obtención de la curva de cinética de secado y el posterior ajuste de los datos a modelos matemáticos, y la construcción de la isoterma de adsorción a los modelos de GAB y BET. La Lenteja de agua (*Lemna minor*) en su estado fresco fue sometida a un proceso de secado a 60 grados centígrados por 6 h consecutivas, con la toma de peso a tiempos establecidos. Por otra parte, la isoterma de adsorción se construyó mediante la colocación de 8 cápsulas con harina de Lenteja de agua (*Lemna minor*) en 5 frascos con 5 sales sobre saturadas para evaluar la adsorción de humedad. Los resultados obtenidos se determina que el modelo de Page es el que mejor describe el proceso de secado, y el modelo de BET es el que mejor se ajusta a la isoterma de adsorción. Los resultados obtenidos sirven como una base para futuras investigaciones para esta potencial planta acuática y su desarrollo en la industria alimentaria.

Palabras clave: Lenteja de agua (*Lemna minor),* cinética de secado, isotermas de adsorción, modelos matemáticos.

ABSTRACT

The need to obtain new sources of food over time has been fundamental for the development and sustainability of humanity. Currently, the trend towards the consumption of functional and nutritious foods has opened a line of research in the food industry. In this context, we are interested in duckweed (Lemna minor), which has nutritional properties, particularly its high protein content, making it a source of interest in recent years. The research focuses on obtaining the drying kinetics curve and subsequently fitting the data to mathematical models and constructing the adsorption isotherm using the GAB and BET models. Fresh duckweed (Lemna minor) was subjected to a drying process at 60 degrees Celsius for 6 consecutive hours, with weight measurements taken at established times. Additionally, the adsorption isotherm was constructed by placing 8 capsules with duckweed flour (Lemna minor) in 5 jars with 5 supersaturated salts to evaluate moisture adsorption. The results obtained determined that the Page model best describes the drying process, and the BET model best fits the adsorption isotherm. These results serve as a basis for future research on this potential aquatic plant and its development in the food industry.

Keywords: Duckweed (Lemna minor), drying kinetics, adsorption isotherm, mathematical models.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Justificación

La Lenteja de agua (*Lemna minor*) es una especie vegetal que presenta un alto contenido de fibra dietética, proteínas y los nueve aminoácidos esenciales **(Xu et al., 2021)**, corroborando con **Appenroth et al., (2018)**, **Compeer & De Best, (2018)**, y **Lam, Appenroth, Ma, & Shoham, (2021)** y **Yahaya et al., (2022)** donde se ratifican estas características nutricionales. El uso en la alimentación humana es poco conocido, a pesar de presentar características nutricionales destacables **Burnand, (2023)** indica que la razón por la cual no se brinda un uso eficiente en la alimentación es por desconocimiento.

Lo expuesto fundamenta el interés de investigar en esta área, viendo necesario empezar por la parte primordial de la ingeniería en alimentos como base sólida para la posterior aplicación en productos específicos dependiendo el área de interés de futuras investigaciones. Por otra parte, en la actualidad la industria alimentaria presenta una alta demanda de productos para consumo inmediato, lo que lleva a buscar alternativas de procesamiento para prolongar el tiempo de vida útil, preservando las características nutricionales **(Agama Naranjo, 2018)**, una de ellas la operación unitaria del secado **(Padilla et al., 2018)**, que es una técnica antigua para conservar, secar o deshidratar, generalmente para facilitar la manipulación, almacenamiento y transporte; existen varios métodos de secado, depende la finalidad, uno de ellos es la utilización de aire caliente **(Cabascango, 2018)**. **Magdalini & Zacharias**, citado por **Padilla et al., (2018)** indican que las temperaturas altas llegan a causar cambios que alteran desfavorablemente las propiedades fisicoquímicas, textura y color; por esta razón es necesario la construcción de las curvas de cinética de secado, donde se pueden determinar el tiempo, temperatura y humedad. Mientras que, por otra parte, la construcción de las isotermas de adsorción tributa información del equilibrio entre la actividad de agua (a_w) y la humedad a temperatura constante **(Gamarra, 2019)**. El ajuste de los datos experimentales del proceso de secado y de la isoterma de adsorción a los modelos matemáticos reportados en la bibliografía, permite conocer los parámetros ideales para que la alteración sea la mínima posible y, el análisis de la estabilidad del material deshidratado en condiciones de almacenamiento **(Agama Naranjo, 2018)**. De esta manera nace la iniciativa de plantear el estudio del modelamiento matemático de la cinética de secado y la isoterma de adsorción de agua de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) al construir curvas a partir de datos experimentales, con la finalidad de aportar

variables adecuadas para el proceso y puedan ser consideradas para un posterior uso en cualquier proceso que resulte adecuado en la industria alimentaria dentro del desarrollo de nuevos productos.

1.1.2 Nuevas fuentes de alimentos

El planeta se mantiene en una constante evolución y mantener este ritmo tan acelerado, es un reto complejo además de los cambios climáticos los cuales han roto cifras históricas en donde se pone en riesgo el suministro de alimentos para la población humana, así se depende de sistemas agroalimentarios eficientes, los cuales tengan la capacidad de adaptación, resistencia y anticipación a estos acontecimientos **(Mukherjee & Fattori, 2022)**. Las nuevas fuentes de alimentos se caracterizan no ser tratadas en masa, como también no ser consumidas en grandes cantidades, lo que genera desventajas en la seguridad de ser consumidos, estos pueden provenir de fuentes vegetales, animales, minerales o microorganismos. Las alternativas a base de matrices vegetales están en una creciente tendencia en los últimos años, pues se consideran sustitutos o complementos de fuentes de nuevos alimentos ya que presentan excelentes propiedades nutricionales como también por el punto de vista de la sostenibilidad ambiental que esta genera **(Calabrese & Ferranti, 2018)**.

1.1.3 Lenteja de agua (*Lemna minor*)

Los ecosistemas se forman de diferentes especies vegetativas y en un sistema acuático las plantas acuáticas son parte fundamental del mismo, por consiguiente, las funciones biológicas que tienen a cargo hacen que se mantenga el equilibrio. Así, estudios han demostrado que las raíces, las cuales pueden estar arraigadas de manera flotante, absorben muchos nutrientes presentes en el agua y su forma de liberación es por medio de la exudación, además de la descomposición de su biomasa, logrando así aportar a la cadena de alimentación de productores primarios **(Schneider et al., 2021).**

La Lenteja de agua (*Lemna minor*) en sus características generales se consideran como plantas acuáticas flotantes en estado de libertad que nunca se sumergen, poseen medidas entre 0,8 a 3,5 mm en su longitud con una raíz filiforme con la longitud entre 4 a 10 mm, su habitad común se encuentra en aguas tranquilas y equilibradas en donde su expansión forma una cobertura plana verdosa **(Schneider et al., 2021)**.

1.1.4 Proteína en la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

Junto con los lípidos y los carbohidratos, la proteína es uno de los tres nutrientes necesarios, al estar compuesta por más de 20 aminoácidos que ayudan al desarrollo y mantenimiento de las fibras

musculares, se considera uno de los "bloques constructores" del cuerpo. Las verduras aportan una cantidad sustancial de nutrientes, minerales, proteínas, ácidos grasos omega-3 y energía de fácil acceso para la agricultura mundial, además de ser la fuente de energía más eficiente. Más de 3000 especies de plantas han sido utilizadas por los seres humanos como alimento a lo largo de la historia, y al menos el 50% de ellas se cultivan con fines comerciales **(N. Ahmed et al., 2022)**.

La proteína principal de la Lenteja de agua, conocida como Rubisco, es un tipo especial de proteína vegetal, que tiene la proporción ideal de los aminoácidos esenciales. Es considerada como una posible fuente futura de proteína dietética; podría reemplazar a la soja como parte de los componentes de los alimentos para animales. Además, presenta una destacada capacidad para gelificar y formar espuma, y tienen el potencial de reemplazar a la carne y los batidos de proteínas al ser seguras para la ingestión humana. También se pueden utilizar en la producción de surfactantes, bioplásticos y recubrimientos **(Compeer & De Best, 2018)**.

1.1.5 Propiedades nutricionales de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

La Lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene un gran potencial como sustituto de la proteína animal, al ser saludable y muy asequible, puesto que es la razón por la cual se ha ido prestando mucha atención en sus nutrientes y metabolitos. Presenta un alto porcentaje de fibra y capacidad antioxidante, por lo que, al ser usado como parte en la formulación de alimentos, mejoraría la salud de los consumidores **(Yahaya et al., 2022)**. De esta manera, en la Tabla 1 se puede visualizar la composición química de diferentes tipos de Lenteja de agua en donde se muestran los principales componentes, la cual la valida el interés investigativo.

Tabla 1

Composición proximal de los tipos de Lenteja de agua en base en peso seco

Tipo	Proteína cruda (%)	Carbohidratos totales (%)	Fibra cruda (%)	Lípidos (%)	Ceniza (%)
L. gibba	25.2	-	9.4	4.7	14.1
L. punctata	28.7	-	9.2	5.5	13.7
S. polyriza	29.1	-	8.8	4.5	15.2
Wo. columbiana	36.5	-	11.0	6.0	17.1
L. minor	17.5	-	29.7	3.4	16.6
Lemna sp.	16.0	35.0	-	9.0	26.0
L. punctata	16.3	24.5	-	-	3.5

L. gibba	41.7	17.6	15.6	4.4	16.2
L. gibba	21.5	-	-	4.5	20.1

Nota. Tomado de Duckweed (Lemnaceae) for potentially nutritious human food: A review. Fuente**, Xu et al., (2021),** pág. 5.

Otro dato importante que se destaca es el de digestibilidad de proteínas (aminoácidos esenciales) mostradas en la Tabla 2, para determinar su calidad se demostró que en la vitro digestibilidad de la especie (*Lemna minor*) es superior al 77.9% realizado por el método de pepsina pancreatina, lo que se deduce que este tipo de proteína tiene una alta facilidad de asimilación y metabolización **(Xu et al., 2021)**.

Tabla 2

Comparación de presencia de aminoácidos esenciales entre especies de Lenteja de agua (g/100 g de proteína)

Aminoácido	**Trp**	**Thr**	**Ile**	**Leu**	**Lys**	**Met**	**Phy**	**Val**	**His**
L. minor	4.24	5.13	5.67	9.6	5.93	1.38	6.01	6.43	2.65
L. gibba	-	3.2	3.87	7.15	4.13	0.83	4.45	4.96	1.89
S. polyrhiza	-	3.45	3.75	6.85	4.3	0.83	4.2	4.4	2.15
L. punctata	-	3.31	3.76	6.88	4.26	1.07	4.38	4.71	1.9
Wo. columbiana	-	2.55	3.06	5.83	3.37	0.87	3.6	3.49	1.18

Nota. Tomado de Duckweed (*Lemnaceae*) for potentially nutritious human food: A review. Fuente, **Xu et al., (2021),** pág. 7.

1.1.6 Cinética de secado

La cinética de secado de una matriz alimentaria consiste en el estudio de la relación directa entre la variación del contenido de agua, con la intensidad que se evapora la misma a través del tiempo en donde se toman en consideración las variables que pueden incidir en los resultados como la humedad del aire de secado y contenido de agua **(Taheri-Garavand & Meda, 2018)**. De esta manera, con todos los datos arrojados por la cinética de secado, permiten determinar la tasa de secado en diferentes etapas, identificar las fases del secado como el periodo de tasa constante y el periodo de tasa decreciente, además evaluar la influencia de variables como la temperatura, la humedad y el flujo de aire. Ahora bien, se deben asumir las siguientes condiciones para modelar la cinética:

- La matriz debe contener el mismo contenido de humedad en todos sus puntos.
- Los coeficientes de transferencia de masa y calor no tienen variabilidad en el proceso.
- Tamaños y formas son constantes.
- La interfase sólida y aire se encuentran en equilibrio.

(Velásquez, 2007).

1.1.7 Modelamiento matemático de la cinética de secado

Modelar la cinética de secado mediante el ajuste a ecuaciones matemáticas establecidas, permite predecir el comportamiento del material durante el secado, ayudan a describir la relación entre la humedad del material y el tiempo de secado, además, proporcionan una base para comparar diferentes condiciones de secado para ajustar el proceso según las necesidades específicas. El uso de modelos matemáticos se basa en la capacidad para ajustar los datos experimentales, permitiendo así la identificación del modelo más eficaz para la investigación **(Lozada et al., 2021)**.

Tabla 3

Modelos matemáticos para la cinética de secado de la Lenteja de agua (Lemna minor)

Modelo	**Ecuación**	**Fuente**	**Matriz evaluada**
Modelo de Newton	$MR = e^{(-kt)}$	**(Morsetto, Lema, Pontin, & Paisio, 2008).**	Perejil (*Petroselinum crispum*)
Modelo de Henderson y Pabis	$MR = ae^{(-kt)}$	**(Vega, Tello, & Lemus, 2007).**	Alga (*Gracilaria chilensis*)
Modelo de Page	$MR = e^{(-kt^n)}$	**(Iglesias et al., 2018).**	Moringa (*Moringa oleífera*)
Modelo de Page modificado	$MR = e^{(-(kt)^n)}$	**(Da Rocha et al., 2012).**	Tomillo (*Thymus vulgaris L.*)
Modelo logarítmico	$MR = ae^{(-kt)} + c$	**(Silva, Mendoza, Sota, & Della Rocca, 2022).**	Muña (*Minthostachys mollis*)
Modelo de Thomson	$MR = 1 + at + bt^2$	**(Bistoni, Iriarte, García, & Calahorra, 2016).**	Pimiento (*Capsicum annuum L.*)

Nota. Ecuaciones más comúnmente usadas en matrices vegetales y consideradas para el modelamiento del secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

1.1.8 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se basan principalmente en la correlación entre la humedad y la actividad de agua, en donde una muestra se coloca en un ambiente con humedad relativa registrada y esta va a absorber la misma hasta llegar a un punto de equilibrio en que su masa será constante **(Guzmán-Hincapié & Zapata, 2018)**. Una isoterma tiene tres secciones A, B y C, dado que la zona A de baja actividad de agua que generalmente comprende el agua ligada, agua estructural y monocapa, en la zona B en que la actividad de agua es intermedia y presenta agua en capilares débilmente unidos a comparación de la zona A, finalmente la zona C que es en donde está el agua libre que está encapsulada en membranas y tejidos o macro capilares **(Anria et al., 2019)**.

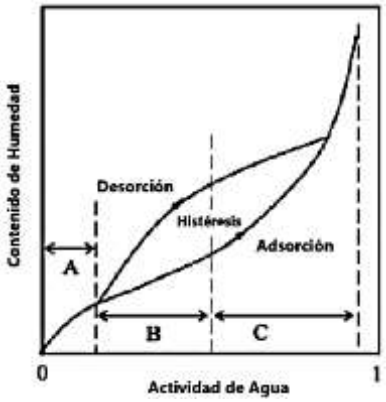


Figura 1. Isoterma de sorción común de una matriz

Fuente: (Andrade et al., 2011).

Tabla 4

Ecuaciones para el modelado matemático de las isotermas de adsorción

Modelo	Ecuación	Fuente	Matriz evaluada
GAB	$\boldsymbol{X_w} = \frac{X_m * C * k * a_w}{(1 - k * a_w) * (1 + (C - 1) * k * a_w)}$	**(Hernández, García, & Vega, 2021).**	Tilo (*Justicia pectoralis*)
BET	$\boldsymbol{X_w} = \frac{X_m * C * a_w}{(1 - a_w) * (1 + (C - 1) * a_w)}$	**(Pergher, Schmalko, & De Battista, 2016).**	Hojas de especies silvestres de (*Maytenus ilicifolia Martius*)

Nota. Ecuaciones más comúnmente usadas en matrices vegetales y por lo cual se consideran adecuadas para el modelamiento del secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Modelar la cinética de secado e isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir la curvatura de la cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) a 60 °C.
- Establecer la isoterma de adsorción de la harina de Lenteja de agua (*Lemna minor*).
- Ajustar los datos experimentales de la cinética de secado a modelos matemáticos referenciales.
- Ajustar los datos de la isoterma de adsorción a modelos matemáticos referenciales.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En el presente trabajo de titulación se usó una metodología experimental la cual se desarrolló en los laboratorios académicos de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. En la Tabla 5 se enlistan los equipos y en la Tabla 6 los recursos materiales.

Tabla 5

Equipos

Recurso
Equipos
Balanza de humedad
Balanza analítica
Deshidratador

Tabla 6

Recursos materiales

Materiales
(*Lemna minor*)
Deshidratador
Aluminio
Balanza analítica
Soluciones nutritivas
Mallas metálicas
Balanza de humedad
Material de papelería
Fundas ziploc
Sales higroscópicas
Frascos de vidrio
Soportes plásticos

2.2 Métodos

2.2.1 Construir la curvatura de cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) a 60 °C.

2.2.1.1 Materia prima

Para la obtención de la materia prima se realizó un cultivo, para lo cual se extrajo una cantidad pequeña de Lenteja de agua (*Lemna minor*) de un tanque reservorio de agua que está ubicado en Ambato, parroquia Atahualpa, barrio La Dolorosa, para posterior realizar la adecuación en tinas con agua y soluciones nutritivas hasta que estas se fragmentaron lo necesario para obtener una cantidad suficiente, posteriormente se realizó una limpieza con agua potable para retirar impurezas extrañas. Finalmente se aplicó una desinfección en que según **ACHIPIA, (2020)** para verduras de hoja o tallo se debe aplicar 5 ml de hipoclorito de sodio en 3 litros de agua potable sumergiendo la matriz alimentaria por un tiempo no mayor a 2 minutos.

2.2.1.2 Humedad

Respecto a la metodología de **Acurio et al., (2023)** el contenido de humedad en el transcurso del proceso de secado e isotermas se determinó por medio de una balanza de humedad.

2.2.1.3 Equipo de secado

El equipo de secado que se utilizó fue de marca Ronco, modelo FD6000WHGEN, con velocidad del aire fijo de 8,0 m/s respecto a la frecuencia del ventilador de 60 Hz, con una potencia de 240 Watts y un rango manipulable de temperatura de 35 ° a 71 °C.

2.2.1.4 Adecuación para el secado

La adecuación para el secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) se realizó en un deshidratador por aire caliente el cual se ajustó la temperatura a 60°C, además se colocaron mallas plásticas de retención en cuatro cuadrantes dentro del equipo para que la materia prima en su estado fresco y seco no se desborde ya que estuvo esparcida por todo el espacio disponible.

2.2.1.5 Secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

Después de la adecuación para el secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) se colocó en un secador de bandejas a 60 °C, esta temperatura fue seleccionada para que el método no sea muy invasivo con la matriz y no afecte significativamente las propiedades físicas y nutricionales como reportan los estudios de **Pantoja-Tirado, Prieto-Rosales, & Aguirre, (2020)** y **Silva et al., (2022)**. Siguiendo la metodología de **Silva et al., (2022)** y **Acurio et al., (2023)** el secado de la matriz se llevó a cabo en días diferentes con la medición periódica de pérdida de masa en lapsos controlados de tiempo, en las dos primeras horas cada 10 minutos y las siguientes horas cada 30 minutos hasta obtener un peso constante. Se realizaron tres réplicas para promediar los datos y reducir el posible error experimental.

2.2.1.6 Obtención de la curva de cinética de secado

Con los datos experimentales se construyó las curvas de la cinética de secado; tiempo (horas) como variable independiente y la humedad en base seca ($X_{b.s}$) como variable dependiente. Analizando el comportamiento mientras se incrementa el tiempo. También se estudió la curva de la velocidad de secado en función del tiempo.

2.2.2 Establecer la isoterma de adsorción de la harina de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

2.2.2.1 Adecuación para las isotermas de adsorción

Siguiendo la metodología descrita por **Acurio et al., (2023)** con pocas modificaciones, se adaptó un medio para evitar interacciones con el exterior, mediante el uso frascos con sello hermético para evitar la interacción del medio interno con el exterior; usando las sales especificadas en la Tabla 7 como factor higroscópico, así mismo se añadió unas gotas de ácido propiónico para evitar el crecimiento fúngico en cada uno de los frascos, se hizo uso de una estructura interna de repisas plásticas donde se colocaron las muestras.

Tabla 7

Sales saturadas como factor higroscópico para las isotermas de adsorción

Nomenclatura	Sal	(a_w)
LiCl	Cloruro de litio	0,1178
CH_3CO_2K	Acetato de potasio	0,2982
$MgCl_2$	Cloruro de magnesio	0,3425

NaBr	Bromuro de sodio	0,5732
$(NH_4)_2SO_4$	Sulfato de amonio	0,8012

Nota. Adaptado de Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento, Fuente, **Acurio et al., (2023)**.

2.2.2.2 Obtención de la curva de la isoterma de adsorción

Como se describe en el estudio realizado por **Acurio et al., (2023)** el procedimiento para llegar a determinar la isoterma de adsorción empezó en la toma de datos, para lo cual se pulverizó la muestra seca de la Lenteja de agua (*Lemna minor*), se colocó en cajas Petri pequeñas y se ubicaron en los frascos con las sales respectivas a una temperatura ambiente promedio de 20±1 °C y una humedad relativa promedio de 80% reportado por **Honorable Consejo Provincial de Tungurahua, (2024)**. Se pesaron las muestras por dos meses, en el día 0, 15, 30 y 60, esta se llevó a cabo en una balanza analítica de precisión 0,0001 g hasta llegar a un peso constante (±0,0005 g) condición que corresponde al equilibrio de la muestra. Para la construcción de la isoterma de adsorción a partir de los datos experimentales, se graficó como variable independiente la actividad de agua (a_w) y la variable dependiente la humedad en base seca ($X_{b.s}$). Analizando y discutiendo el tipo de isoterma que presenta como característica la matriz estudiada.

2.2.3 Ajustar los datos experimentales de la cinética de secado a modelos matemáticos referenciales.

Siguiendo el método de **Acurio et al., (2023)** con los datos obtenidos experimentalmente (peso) se ajustaron a los modelos matemáticos referenciales especificados en la Tabla 3, que se establecieron de manera previa en base a la revisión bibliográfica. Con el uso de Microsoft Excel y el programa Veusz se hallaron las constantes específicas usando la linealización en las ecuaciones.

Para lo cual se calculó la razón de humedad con la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$$

Donde:

Xb.s = Humedad en base seca en cada tiempo (kg agua /kg base seca)

X_0 = Humedad inicial (kg agua /kg base seca)

Xe = Humedad en equilibrio (kg agua /kg base seca)

Se obtuvieron las constantes de la curva para cada modelo, **a, b, n, k** cuyos valores dependen de la temperatura de proceso.

La calidad de ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de determinación (r^2), en el que se escogió el modelo que obtuvo el valor superior para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error medio relativo (%E) como describe Silva et al., (2022).

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

Donde:

X_{ei} = contenido de humedad experimental ($g_{agua}/g_{m.s.}$)

X_{ci} = contenido de humedad calculada a partir de cada modelo ($g_{agua}/g_{m.s.}$)

n = número de observaciones

2.2.4 Ajustar los datos experimentales de la isoterma de adsorción a modelos matemáticos referenciales

Con los datos obtenidos experimentalmente, se ajustó a los modelos matemáticos referenciales especificados en la Tabla 4, que se establecieron de manera previa en base a la revisión bibliográfica. Al hacer uso de Microsoft Excel y el programa Veusz se hallaron las constantes específicas ecuaciones en que se determinó la humedad de equilibrio y las constantes:

Para lo cual se calculó la humedad de equilibrio con la siguiente ecuación:

$$w_{e(b.s)} = \frac{P_0 * w_0 * \Delta P}{P_0 * (1 - w_0)}$$

w_e = humedad en equilibrio

P_0 = peso inicial de la muestra

w_0 = humedad inicial de la muestra

ΔP = variación de masa (equilibrio y peso inicial)

Se obtuvieron las constantes de la curva para cada modelo X_m, c, k.

La calidad de ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de determinación (r^2), el que se seleccionó el modelo que obtuvo el valor superior para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error medio relativo (%E) **(Silva et al., 2022)**.

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

Donde:

$\mathbf{X_{ei}}$ = contenido de humedad experimental (g $_{agua}$/g $_{m.s.}$)

$\mathbf{X_{ci}}$ = contenido de humedad calculada a partir de cada modelo (g $_{agua}$/g $_{m.s.}$)

n = número de observaciones

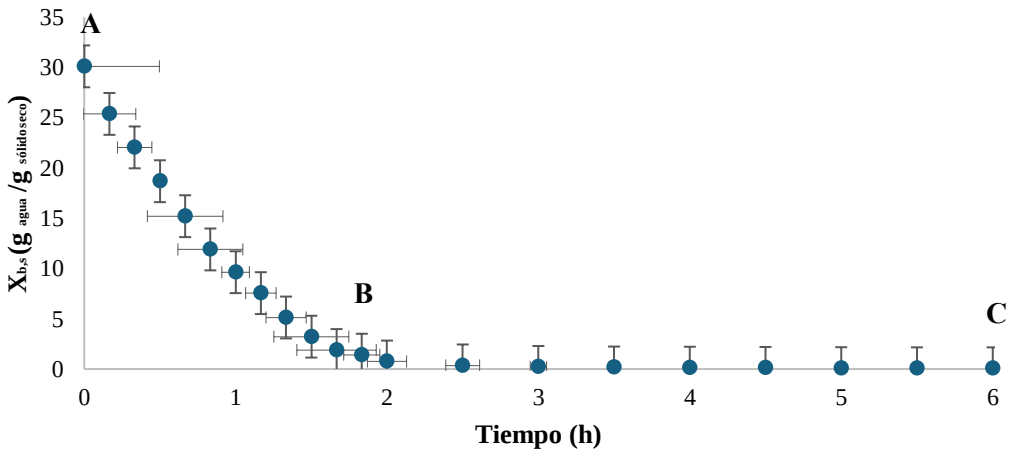
CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de resultados

3.1.1 Curvas y modelamiento de la cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

La pérdida de humedad respecto al tiempo en el proceso de secado de la Lenteja de agua *(Lemna minor*) se visualizan dos etapas del secado entre los puntos A, B y C en un orden decreciente de humedad respectivamente, este comportamiento se mantiene constante durante las seis horas de secado como se muestra en la Figura 2. La Lenteja de agua (*Lemna minor*) en su etapa inicial, región A – B, pierde mayor cantidad de humedad de forma rápida, esto se podría atribuir a la morfología de la especie que es pequeña y su superficie no presenta mayor limitación para que el aire caliente retire la humedad hasta llegar al punto B como explica **UnADM, (2020)** en su libro de operaciones unitarias. En la siguiente región B – C el secado empieza a tomar un comportamiento constante, específicamente desde las 2 a 6 horas en que la concentración de humedad (X_{bs}) se mantiene lo más cercana al equilibrio, se debe a que la mayor parte de agua libre ya fue retirada en la primera región y el agua ligada es la más compleja de retirar, así asegurando que la tasa de evaporación ha alcanzado la igualdad a la tasa de absorción de humedad del ambiente llegando finalmente a un valor constante de $X_{b.s}$ 0,0745 g $_{agua}$ \ g $_{sólido\ seco}$ **(Squeo & León, 2007)**. De esta manera, los resultados obtenidos en el proceso de secado se concatenan con la investigación de **Flores, (2019)** donde se estudian especies amazónicas y alcanzan la misma tendencia de la curva con las regiones especificadas similares a las obtenidas.



Nota. Las barras de error tienen su valor máximo en ±0,4966 y mínimo en ±0,0001.

Figura 2. Curva experimental de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

3.1.1.1 Curva de velocidad de secado

La velocidad de secado se divide en tres periodos clave, el periodo A - B el cual es el de inducción o ajuste, el periodo B-C antecrítico o de velocidad de secado constante, seguido del periodo C - D que es el primer periodo proscritico y finalmente periodo D - E llamado segundo periodo proscritico **(Ruiz, 2016).** Estos periodos se presentan en la Figura 3 en la curva de velocidad de secado.

El periodo A - B es el punto inicial en el descenso de la velocidad de secado, la principal característica de este periodo fue el calentamiento de la matriz, se evidenció que la velocidad de evaporación se incrementó y el calor penetrante alcanzó su velocidad máxima como describe **Parikh, (2014)** para el secado de sólidos. En esta etapa se asume que el acondicionamiento del secado da su inicio, entonces todos los factores externos posibles pueden influenciar en el secado además de la cantidad de agua adquirida por la planta al crecer en un medioambiente acuático, hasta que se cree un ambiente adecuado para generar la estabilización el cual según los resultados presentados dura 10 minutos con una reducción de humedad de 4,73 g_{agua} / $g_{sólido\ seco}$ determinando un valor alto.

Posteriormente, se presenta la sección B – C (periodo antecrítico), en este tramo la velocidad es constante y máxima, aquí se retiró principalmente el agua no ligada de la matriz estudiada. Se considera que los mecanismos de remoción están en su punto más alto de eficacia **(Parikh, 2014)**. De esta manera se visualiza en la Figura 3 una tendencia semi constante con una ligera proyección ascendente para volver al descenso, esta transición tuvo un tiempo aproximado de 40 minutos y se retiraron 14,9095 g_{agua}/ $g_{sólido\ seco}$ para llegar al punto C que se considera de humedad crítica con un valor de 15,2028 g_{agua} / $g_{sólido\ seco}$. Las posibles variaciones a este proceso como el leve incremento en la velocidad de secado entre el punto B - C podrían deberse a factores externos como la variación de temperatura, humedad relativa del día o un fallo en la distribución de la matriz en el equipo de secado como respalda el estudio de **Durán & Rodríguez, (2021)** en el diseño de una cámara de deshidratación.

En la sección C - D, primer periodo proscritico empieza la transición de eliminación de humedad por el proceso de secado, presenta una tendencia decreciente por la pérdida de humedad mientras el tiempo transcurre, de esta manera hace que la velocidad dependa directamente del tipo de humedad residual a retirar de la matriz vegetal **(Parikh, 2014)**. El punto C de humedad crítica, la velocidad de secado presenta una disminución notable por una mayor dificultad de remoción de humedad ligada a la matriz y empieza a disminuir para finalmente llegar al punto D - E identificándose el segundo periodo proscritico, aquí se pierde la relación con la anterior sección y se trata de eliminar el agua ligada lo cual provoca la reducción considerable en la velocidad de secado, la humedad residual es mínima y se obtuvo un valor final de humedad de 0,0745 g_{agua} / $g_{sólido\ seco}$ en un tiempo de 6 horas que duró el proceso. Estos

resultados se apoyan en el estudio de **Sarvestani et al., (2014)** que asume la variabilidad de la tendencia de la curva se debe a factores externos.

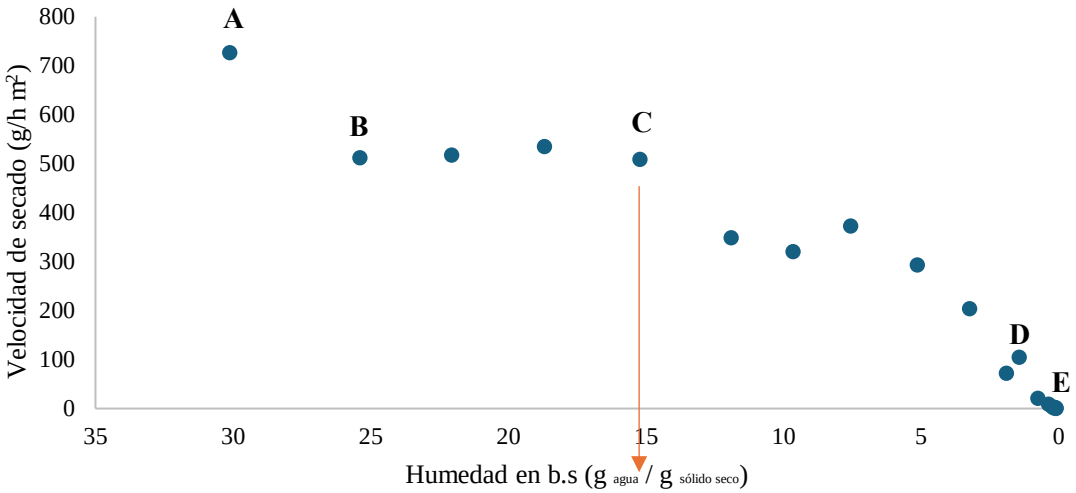


Figura 3. Curva de velocidad de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

3.1.1.2 Curvas de la cinética de secado

Los datos obtenidos en el secado, específicamente el tiempo y peso a una temperatura fija de 60 °C, fueron ajustados a seis modelos matemáticos propuestos en la Tabla 3. La selección del mejor modelo fue de acuerdo con parámetros de elección especificados como el coeficiente de determinación (r^2) y las constantes que describen el comportamiento del secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

La Figura 4 demuestra la relación entre el tiempo (t) y el logaritmo natural de la razón de humedad (MR) como variable dependiente en el eje Y; en el proceso de secado, se ajustaron los datos resultantes al modelo de Newton, se determinó el coeficiente de determinación r^2 y la constante k **(Oyerinde AS, 2016)**. Los puntos azules representan una tendencia negativa la cual demuestra la disminución de humedad respecto al tiempo a medida que se elimina agua, los datos experimentales se ajustaron de manera efectiva durante las etapas iniciales de secado; sin embargo, comienzan a alejarse del ajuste lineal en las etapas posteriores, particularmente en t=3,5 h. Esta disparidad implica que otros elementos que el modelo de Newton no puede tener en cuenta, afectan la cinemática del proceso en las etapas posteriores del secado, así la difusión de la humedad interna y los cambios ambientales son algunas de las posibles causas de estas fluctuaciones **(Méndez et al., 2018)**. Estos resultados son similares a los obtenidos por **Vega Gálvez, Ireland, & Lemus Mondaca, (2007)** en donde la tendencia del ajuste también sigue el orden decreciente.

En los valores obtenidos en la Figura 4, el coeficiente de determinación r^2 fue de 0,9520 significa que el 95,20% de los datos se han ajustado correctamente, sin embargo, el 4,80% restante son datos que no están acoplados al modelo de Newton como se observa en el tiempo mayor a las 3,5 h con la facultad de que estos estén influenciados por factores externos como lo explica **Turan & Firatligil, (2019)** en el estudio de secado de hojas de tomillo (*Thymus vulgaris*). La constante de secado k obtuvo un valor de 1,6932 h^{-1} mostrando un decrecimiento de humedad rápido, ya que el valor se considera alto, esto se atribuye a las características propias de la matriz como su porcentaje inicial de humedad de 95,94 ± 0,1650 %.

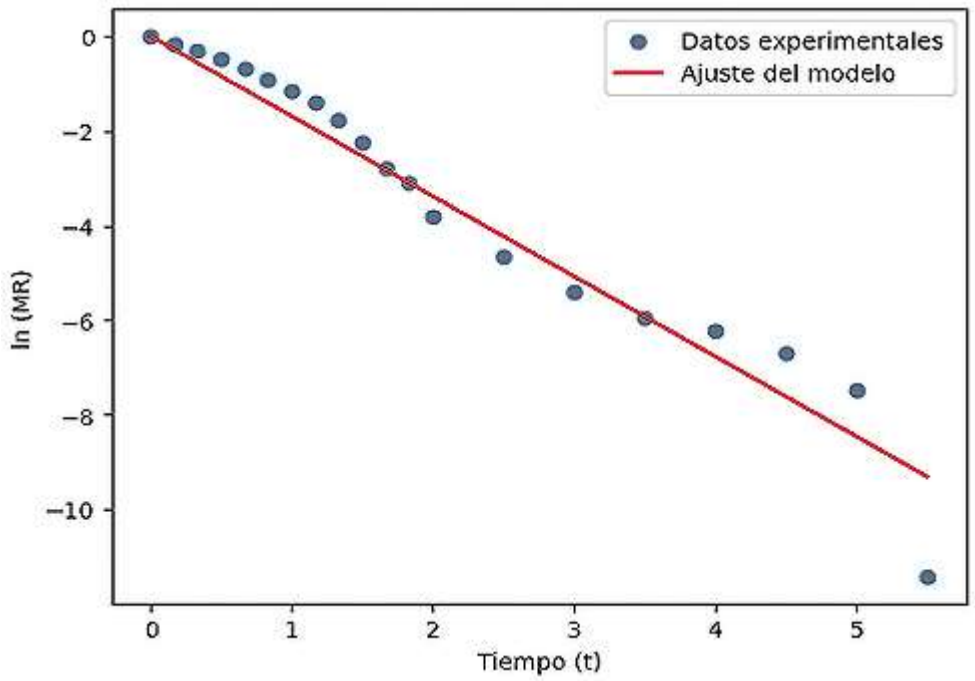


Figura 4. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Newton.

El análisis de la Figura 5 describe el ajuste experimental del secado al modelo de Henderson y Pabis, en esta ecuación se obtiene un valor del coeficiente de determinación r^2 de 0,9857 que indica que el 98,57% de la variabilidad en los datos experimentales es explicada por el modelo y existe una fuerte concordancia entre los puntos y el ajuste **(García et al., 2023)**. De esta manera, el modelo captura adecuadamente la cinética de secado de la matriz vegetal, sin embargo, también se muestra un alejamiento de los datos en el juste en el tiempo 1,3 h hasta las 2,5 h que retoma la tendencia. La velocidad de secado es rápida por el valor de k = 1,2762 h^{-1} que demuestra la pérdida de humedad en las etapas iniciales del proceso de secado. Por otro lado, se obtuvo un valor de la constante a = 1,05 cercano a 1 que indica que el modelo comienza su predicción y físicamente significativa con una humedad relativa muy cercana a la humedad inicial real del material con una pérdida rápida de esta **(Valle et al., 2020)**.

Según los resultados de la cinética de secado de **López-Mejía, Andrade-Mahecha, & Martínez-Correa, (2019)** en el secado convectivo a una temperatura de 60 °C también se obtiene un valor alto en el coeficiente de determinación r^2 de 0,994 sin embargo, en sus constantes obtienen valores de k = 0,33 h^{-1} y a = 0,65 de este modo muestra que el secado fue lento a diferencia al aplicado en esta investigación y se asume que podría ser causado por las condiciones del equipo de secado utilizado.

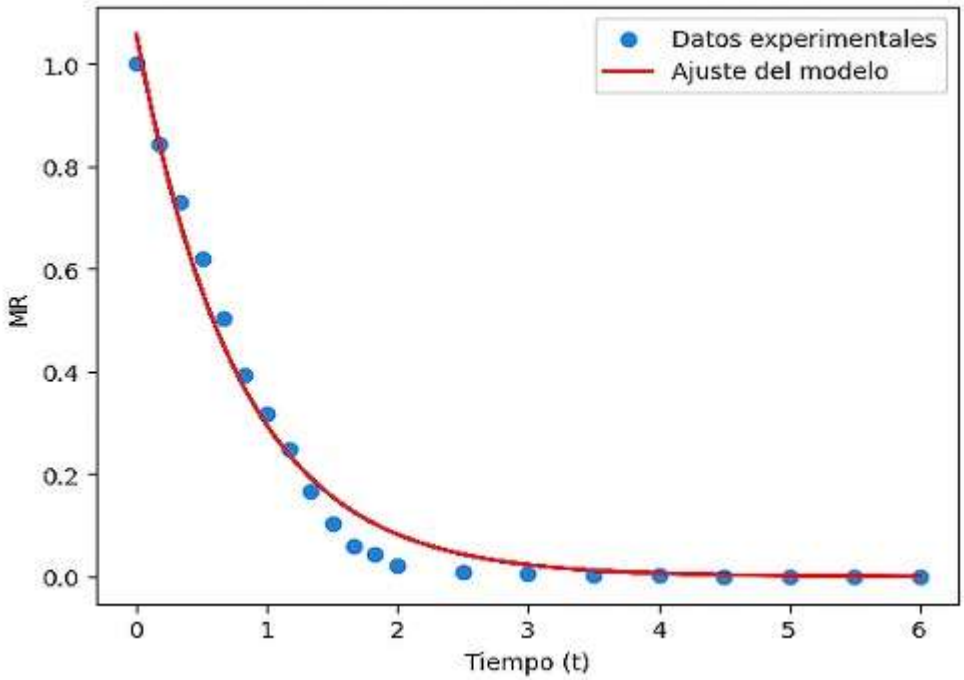


Figura 5. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Henderson y Pabis.

La Figura 6 describe el ajuste de los datos experimentales al modelo de Page. La constante k = −1,43 h^{-1} indica la velocidad a la que se elimina la humedad del material, el signo negativo y el valor relativamente alto demuestran que el secado del material fue rápido en las etapas iniciales **(López-Mejía et al., 2019)**. El valor de n = 1,12 representa que la velocidad de secado varía con el tiempo, en lugar de seguir una ley exponencial simple, lo que resalta la naturaleza no lineal del proceso de secado **(Nilnont et al., 2015)**. Finalmente, se encuentra que el modelo de Page explica el 95,8% de la variabilidad de los datos experimentales, con un r^2 = 0,958 lo que propone un alto grado de concordancia entre los datos y el ajuste del modelo, tomando en cuenta que también existen valores que no se ajustan adecuadamente desde la hora 4 a 6.

Según la investigación de **Giraldo et al., (2008)** en el modelamiento matemático con la ecuación de Page se obtiene un valor mayor de r^2 = 0,999 el cual demuestra un excelente acoplamiento de los datos a diferencia de la Lenteja de agua (*Lemna minor*). Así mismo con una constante k = 0,0279 h^{-1} lo cual demuestra un secado muy lento ya que este es cercano a cero y un valor de n = 2,0911 lo que implica

que la naturaleza del secado es altamente no lineal, estos valores discrepan debido a las condiciones del proceso de secado.

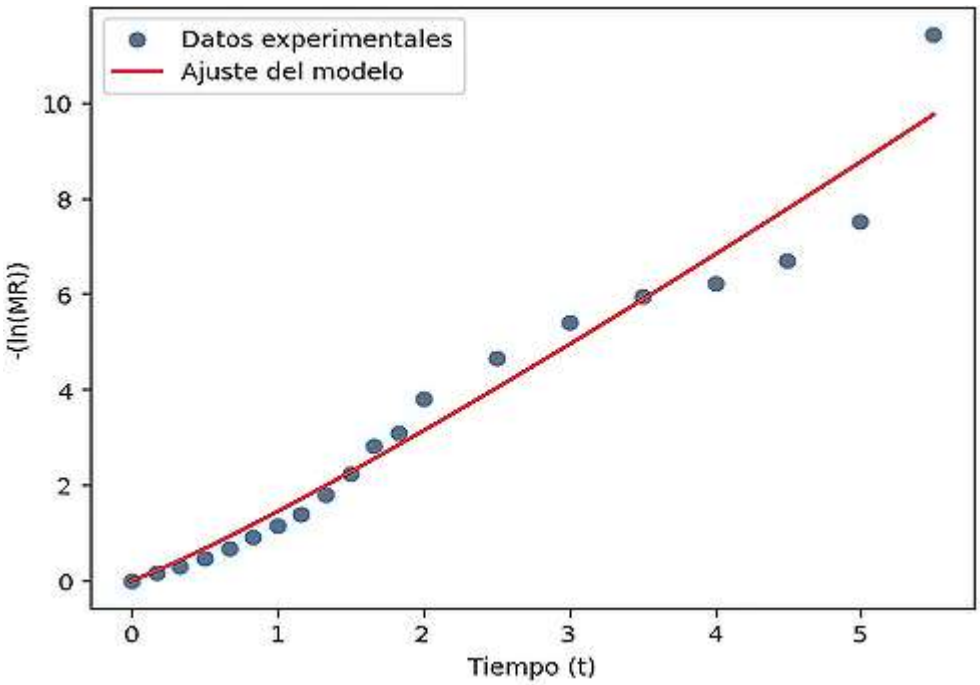


Figura 6. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Page.

El modelo de Page modificado en la Figura 7 representa con precisión el proceso de secado del material estudiado, con valores específicos de k = 1,6 h^{-1} y n = 1,21 parámetros considerados altos, los cuales presentan un secado acelerado. La fuerte correlación entre los datos experimentales y el coeficiente de correlación r^2 = 0,9859 demuestra que los componentes del modelo son adecuados para predecir el comportamiento del secado. Los valores predicen que algunos elementos pueden estar implícitos en los parámetros utilizados o tener un efecto secundario, como la temperatura o el flujo de aire **(Verma et al., 2022)**. El análisis gráfico y los parámetros obtenidos indican la precisión del modelo de Page modificado para describir el proceso con un r^2 cercano a 1 confirmando que el modelo es válido y se puede aplicar a cinemáticas de secado similares **(Inyang et al., 2018)**.

Según el proceso de cinética de secado en la investigación de **Acurio et al., (2023)** en el modelo de Page modificado en tubérculos obtiene valores de k = 0,49 h^{-1} y n = 1,17. Así, el valor de n es similar y dependiente de la temperatura, a diferencia del valor k. Esto sugiere que la principal variación podría deberse al equipo y la matriz alimentaria utilizada que no permitió una transferencia de humedad rápida, a diferencia de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

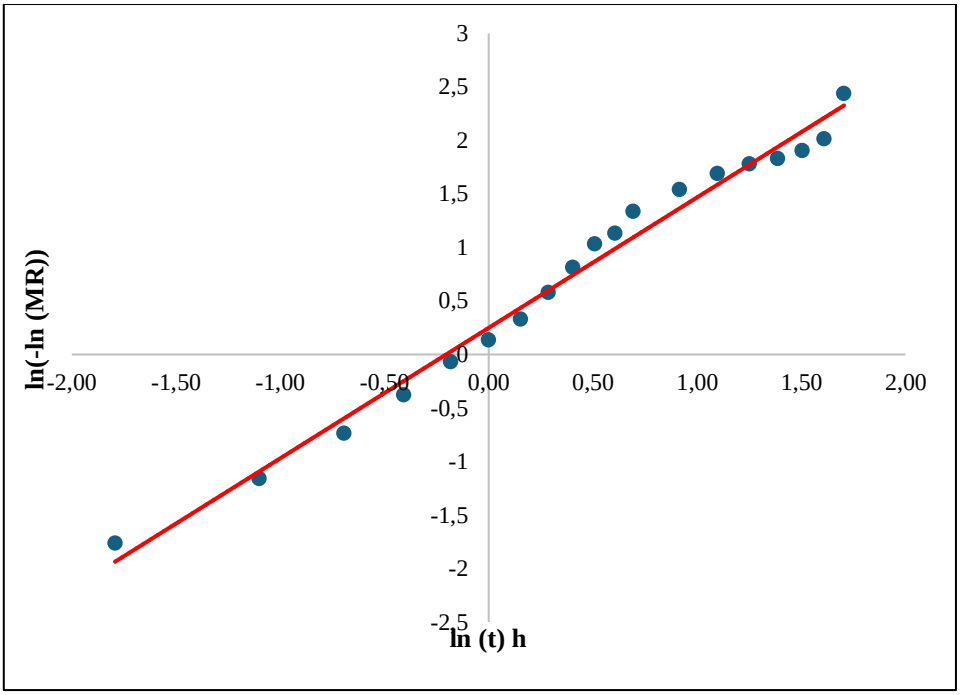


Figura 7. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Page modificado.

El modelo Logarítmico presentado en la Figura 8 muestra la fracción de humedad residual del material, una medida crítica de la eficacia del proceso de secado y se expresa mediante el ajuste de los datos de secado experimental. Se determinó un coeficiente de correlación r^2 = 0,9870 al ser uno de los valores más altos entre los modelos, este número proporciona una muy buena representación del proceso de secado, incluidas tanto las primeras etapas rápidas como las últimas más lentas **(Maygualema et al., 2023)**. La constante de velocidad k con un valor de 1,28 h^{-1}, indica que un proceso de secado es bastante eficiente y es responsable de la rápida disminución de la humedad. Por otro lado, el valor de la constante (a) predice que, en el inicio del proceso de secado, la relación de humedad es proporcional a 1,14 veces la cantidad que se reducirá exponencialmente con el tiempo **(Khaloahmadi et al., 2023)**. Finalmente, la constante c = -0,0228 con un valor negativo significa que la relación de humedad se ajusta para llegar a un valor ligeramente negativo en lugar de estabilizarse en cero o en una humedad residual positiva, se asume que este valor es posiblemente provocado por la fase inicial del secado donde la pérdida de humedad es muy rápida y también se atribuye este valor negativo a cuestiones propias de la matriz, del equipo, metodología, modelo matemático y factores externos **(Simpson et al., 2017)**.

En la aplicación del modelo Logarítmico en el estudio de **Puente-Díaz, Echegaray-Pacheco, Castro-Montero, & Scala, (2013)** en que sus valores de k y a son similares al ser estos relativamente más bajos lo que define un secado lento, sin embargo, su valor "c" es positivo de 0,067 lo cual dictamina que la curva de la cinética lograda no necesita ningún ajuste a diferencia del modelo Logarítmico en el secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

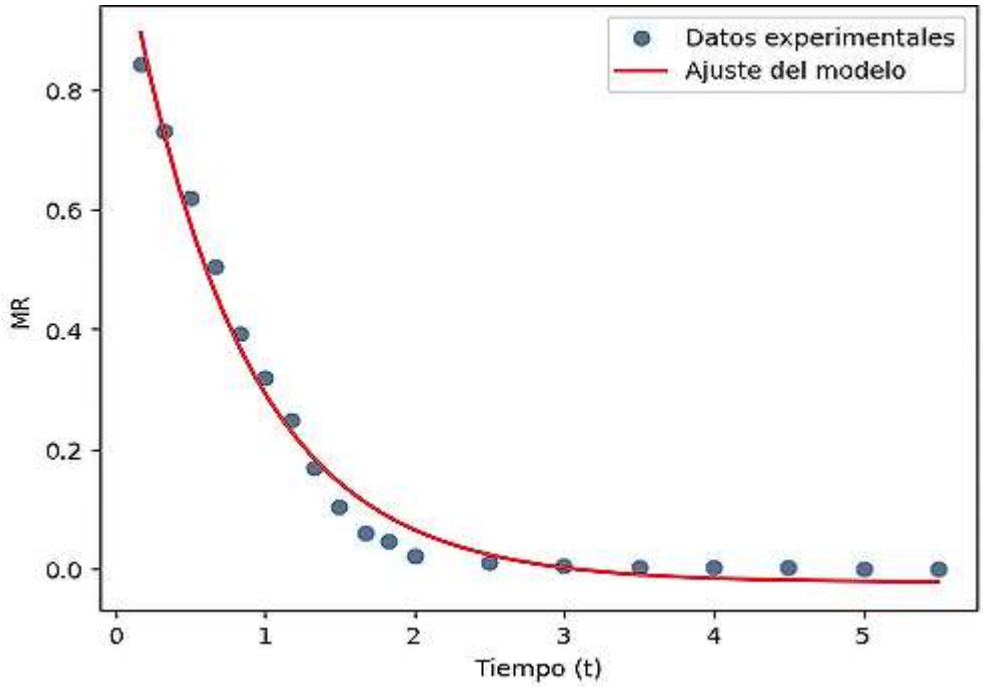


Figura 8. Ajuste de la cinética de secado al modelo Logarítmico.

La Figura 9 representa el ajuste de los datos experimentales de secado al modelo de Thompson, la variabilidad de los datos de secado se explica por el coeficiente de determinación de r^2 = 0,8424 un porcentaje inferior al de los cinco modelos anteriores. Los parámetros calculados del modelo Thomson, a = -0,6341 y b = 0,084 describen que la variable de respuesta MR exhibe una rápida caída de humedad al inicio del secado. El valor negativo que demuestra que la relación de humedad disminuye linealmente, y luego alcanza gradualmente un mínimo antes de comenzar a aumentar ligeramente, como lo muestra el valor positivo de "b" estas tendencias son consistentes con la forma parabólica del gráfico **(Carteri et al., 2014)**. Los datos experimentales que demuestran una rápida caída de la razón de humedad que alcanza un mínimo alrededor de t = 4 h, antes de aumentar ligeramente, esto se debe tanto a una posible rehidratación o el ruido de la medición es causante del mínimo aumento observado al final **(Buzrul, 2022)**.

Dado que el modelo Thompson predice los valores de la relación de humedad negativa (MR) que no es físicamente alcanzable, no es válido para describir la cinética de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*). La MR que representa la fracción de humedad residual del material después del secado, debe estar entre (0 – 1) y el gráfico demuestra como el ajuste del modelo se desvía drásticamente de los datos experimentales, produciendo valores negativos, esto podría deberse a que la ecuación de Thomson fue inicialmente construida para la simulación de secado de granos de maíz **(Parra-Coronado et al., 2008)**.

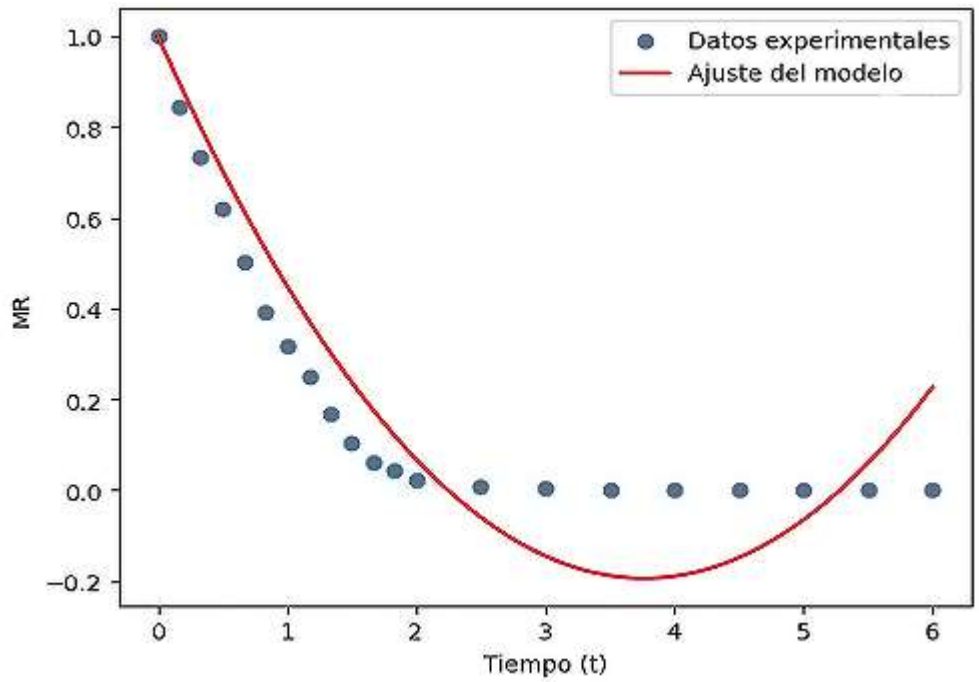


Figura 9. Ajuste de la cinética de secado al modelo de Thomson.

En la Tabla 8 se especifican los valores obtenidos en el ajuste de los datos experimentales de secado a los modelos matemáticos referenciales, se evidencia que el mejor ajuste tomando como referencia el coeficiente de determinación r^2 es el Page con un valor de 0,9580 ya que, aunque el modelo Logarítmico tiene un valor r^2 mayor de 0,9870 su error cuadrático medio (9,93) es muy alto.

Tabla 8

Modelos y parámetros obtenidos en el ajuste de los datos en las ecuaciones de cinética de secado

Modelos	**r^2**	**SE**	**P**	**Parámetros**				
				k	**a**	**b**	**c**	**n**
Newton	0,9520	1,2489	1,0121	1,69				
Henderson y Pabis	0,9857	22,3133	5,5523	1,27	1,05			
Page	0,9580	2,1782	0,707	-1,43				1,12
Page modificado	0,9859	11,8713	2,8300	1,60				1,21
Logarítmico	0,9870	9,9307	4,7878	1,28	1,14		-0,02	
Thomson	0,8424	2,918	0,0017		-0,63	0,084		

Nota. Coeficiente de determinación (r^2), error cuadrático medio (SE), desviación relativa porcentual media (P).

La Tabla 9 muestra los respectivos modelos matemáticos utilizados para el ajuste de los datos experimentales del secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) en donde sus constantes calculadas están reemplazadas.

Tabla 9

Modelos matemáticos con sus respectivas constantes remplazadas

Modelo	**Ecuación**
Newton	$MR = e^{(-1{,}69\ x\ t)}$
Henderson y Pabis	$MR = 1{,}05\ e^{(-1{,}27\ x\ t)}$
Page	$MR = e^{(-(-1{,}43)\ x\ t^{1{,}12})}$
Page modificado	$MR = e^{(-(1{,}60\ x\ t)^{\ 1{,}21})}$
Logarítmico	$MR = 1{,}14\ e^{(-1{,}28\ x\ t)} + (-0{,}02)$
Thomson	$MR = 1 + (-0{,}63)\ t + 0{,}084\ t^2$

Nota. El reemplazo de los valores de k, a, b, c, n son tomados de la Tabla 8.

3.1.2 Curva de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*)

La Figura 10 representa el comportamiento de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) en su estado seco a cinco condiciones diferentes de almacenamiento durante dos meses. Los puntos representados en orden de 1 a 5 corresponden a cada sal utilizada: Cloruro de litio (1), Acetato de potasio (2), Cloruro de magnesio (3), Bromuro de sodio (4) y Sulfato de amonio (5) con su eje x que representa la actividad de agua de cada una de estas, valore especificados en la Tabla 7. La Figura 10 muestra una tendencia característica de una isoterma Tipo II, que es típica de la adsorción multicapa en superficies heterogéneas y consistente con las propiedades esperadas de un material biológico que están más estrechamente alineadas con la isoterma de adsorción que se muestra en estado seco **(Zaheer et al., 2019)**.

El análisis de la Figura 10 en el punto 1 que corresponde al cloruro de litio, presenta un nivel de adsorción bajo, esto podría atribuirse a las propiedades de esta sal que tiene una alta capacidad de desecación al reducir la disponibilidad de agua en el medio limitando la disponibilidad de adsorción a la matriz vegetal **(Bouzenada et al., 2016)**. El punto dos del acetato de potasio se observa un nivel de adsorción aún más bajo aún si este brinde una mayor actividad de agua mayor, se puede asumir este resultado a que es posible que el cloruro de litio cree un ambiente más propicio para la adsorción de las

moléculas de agua, así mismo en el punto 3 que ligeramente es mayor al punto 2, demostrando también la capacidad higroscópica del material de estudio como describe **Bouzenada et al., (2016)** en su estudio de comparación de sales. En el punto 4 del bromuro de sodio se observa un aumento significativo de humedad en base seca a medida que la actividad de agua de la sal alcanza valores medios, significa que hay suficiente agua disponible para llenar los sitios de adsorción en este ambiente. Finalmente, el punto 5 perteneciente al sulfato de amonio demuestra que existe un ambiente con alta disponibilidad de agua, saturando la capacidad de adsorción de la muestra con una alta actividad de agua, la Lenteja de agua (*Lemna minor*) adsorbe notablemente más humedad, resultados similares al de **Borges-Machado et al., (2024)** en el estudio de la (*Pereskia aculeata Miller*) en su isoterma de desorción.

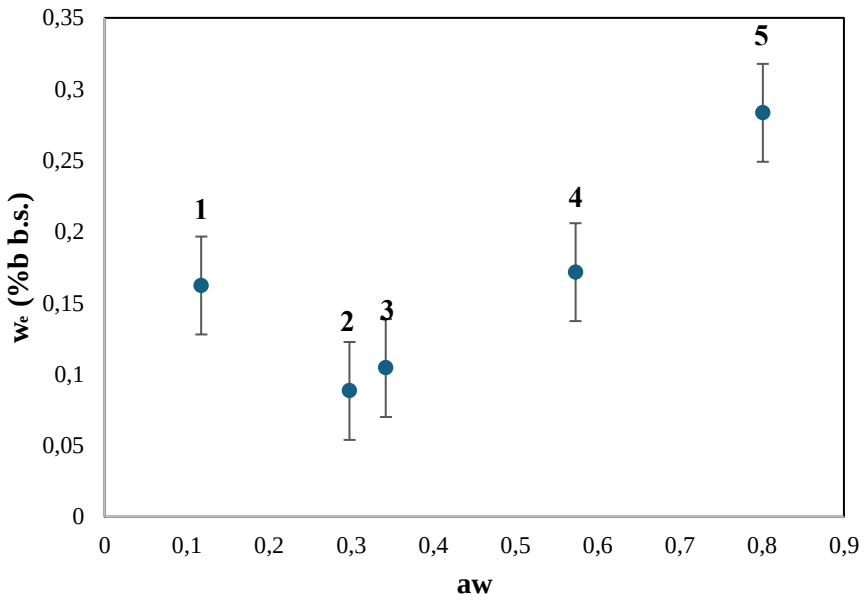


Figura 10. Isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

Los parámetros de los modelos GAB y BET aplicados a la isoterma de adsorción de agua de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) se muestran en la Tabla 10. El modelo BET tiene un coeficiente de determinación más alto que el modelo GAB, lo que indica un mejor ajuste, con base en varias investigaciones, es bien sabido que el modelo BET puede representar con precisión la adsorción en superficies heterogéneas, particularmente cuando se trata de materiales porosos y presiones relativas **(Bennett, 2024)**.

El valor máximo de C se observa en el modelo GAB en donde hay una mayor interacción entre la superficie de la Lenteja de agua y las moléculas de agua, el valor de C es indicativo de la energía de adsorción de la primera capa de moléculas sobre el material. Esta discrepancia se puede atribuir a las características distintivas de los modelos a diferencia del modelo BET, que se concentra en la monocapa

y el modelo GAB es conocido por su capacidad de tener en cuenta la adsorción en superficies más complejas y heterogéneas, lo que puede indicar una mayor energía de adsorción **(San Martín, 2020)**.

La cantidad de agua adsorbida en una sola capa molecular sobre la superficie del material está representada por el contenido de humedad de la monocapa **(Talens Oliag, 2020)**. Los valores encontrados para w_0 en ambos modelos son bastante cercanos, lo que indica una consistencia en las predicciones de los dos modelos sobre el volumen de agua adsorbida en la monocapa.

Un valor de k cercano a 1 indica que las energías de adsorción en las capas superiores son similares a la energía de condensación, lo cual es típico en sistemas con adsorción física, la constante k en el modelo GAB representa la relación entre las energías de adsorción de las capas superiores y la energía de condensación del agua **(Murphy et al., 2023)**.

Los resultados obtenidos en el estudio de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) son muy parecidos a los obtenidos en el estudio de **M. W. Ahmed et al., (2018)** en que los parámetros de humedad en la monocapa w_0 no tienen diferencia significativa. En el calor de adsorción de la monocapa en el modelo de GAB y BET si difieren lo resultados, sin embargo, esta es muy corta, lo cual podría atribuirse a la matriz alimentaria usada que en este caso es harina de trigo. Finalmente, el valor de la constante de adsorción solamente difiere ±0.1 asegurando que los resultados han sido correctamente calculados.

Tabla 10

Parámetros obtenidos del modelo de GAB y BET del modelado de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (Lemna minor)

Parámetros	GAB	BET
$\mathbf{r^2}$	0,8970	0,9694
C	23,9623	14,7820
$\mathbf{w_0}$	0,0517	0,0505
k	0,8945	

Nota. Coeficiente de determinación (r^2), calor de adsorción de la monocapa (C), humedad en la monocapa (w_0), constante de adsorción (k).

La Figura 11 muestra el ajuste del modelo GAB a la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*). Los puntos representan la cantidad de agua adsorbida (aw/we) a diferentes actividades de agua (aw), se puede visualizar que la cantidad de agua adsorbida aumenta hasta un máximo alrededor de aw = 0.5, alcanzando valores cercanos a 3,5 para disminuir ligeramente a valores mayores de aw que estos son correspondientes a cada sal utilizada de la Tabla 7. El modelo GAB ajusta los datos experimentales muestra una concordancia con los puntos en el rango de aw entre 0,2 y 0,6. A bajas actividades de agua (aw < 0.2), el modelo predice una rápida adsorción y refleja una fuerte interacción inicial con el agua. A altas actividades de agua (aw > 0,6), la cantidad de agua adsorbida disminuye ligeramente, lo cual es coherente con la desorción o saturación de los sitios de adsorción como lo explica **Worch, (2012)** de tecnología de adsorción en el tratamiento de agua.

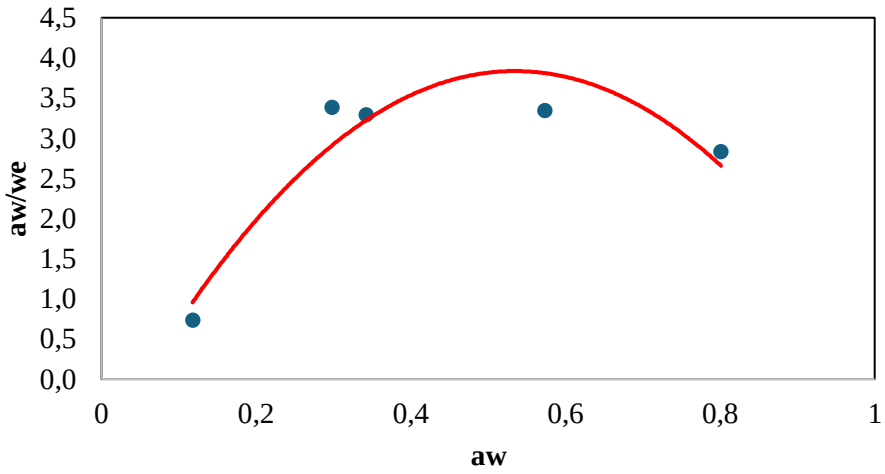


Figura 11. Ajuste de la isoterma de adsorción al modelo de GAB.

La Figura 12 muestra el ajuste del modelo BET a la isoterma de adsorción de agua en la Lenteja de agua (*Lemna minor*). Los valores en la gráfica indican que la cantidad de agua adsorbida aumenta de manera significativa con el incremento de la actividad de agua. A baja actividad de agua la cantidad de agua adsorbida es baja y a medida que la actividad de agua aumenta hasta aproximadamente 0,8 la cantidad de agua adsorbida se incrementa significativamente, alcanzando valores de aw/we cercanos a 14. El modelo BET ajusta correctamente a los datos experimentales, mostrando una tendencia de crecimiento exponencial de la cantidad de agua adsorbida con respecto a la actividad de agua. Esto sugiere que la adsorción es más eficiente a mayor actividad de agua, lo cual es consistente con el comportamiento esperado según el modelo BET, que es adecuado para describir la adsorción multicapa en superficies heterogéneas **(Murphy et al., 2023)**.

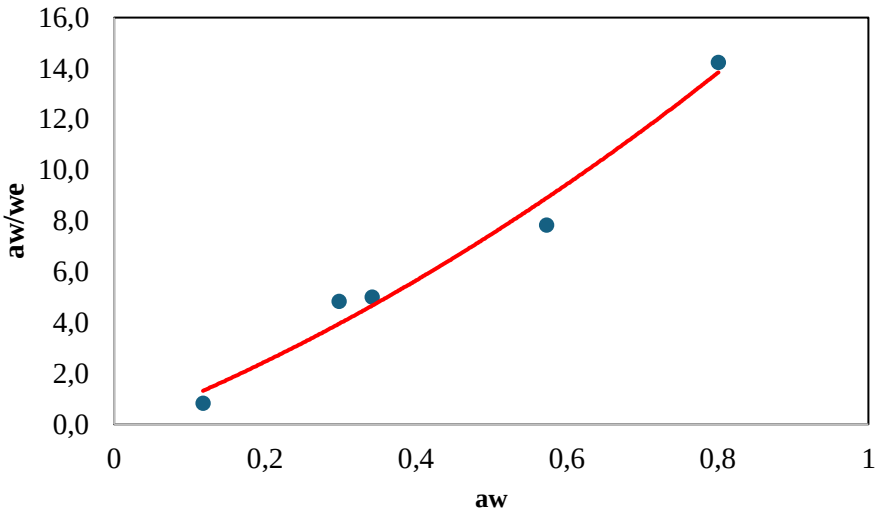


Figura 12. Ajuste de la isoterma de adsorción al modelo de BET.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El modelado de la cinética de secado y la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) proporciona una comprensión detallada sobre el proceso de pérdida de humedad. Los resultados obtenidos son esenciales optimizar los procesos y almacenamiento. Además, facilita el diseño y control de procesos de deshidratación y conservación, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de este recurso natural.

- El secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) a una temperatura de 60 °C por el tiempo de 6 horas, presentó una disminución acelerada del contenido de agua en el periodo inicial de 2 horas y posteriormente el secado siguió una tendencia más lenta en las próximas 3 horas; de esta manera se llega a la fase crítica en donde se trata de eliminar el agua residual hasta llegar a la homogeneidad. Los datos experimentales recopilados presentaron alto nivel de confianza ya que, su desviación estándar máxima llega a ± 0,78 siendo un valor menor a 1, aseverando que la variabilidad que presentó no es alta.

- La curva de isoterma de adsorción de la harina de Lenteja de agua (*Lemna minor*) presentó una forma sigmoide resaltando las diferentes etapas en el proceso de adsorción; se evidenció que, en las regiones de baja actividad de agua, la humedad tiene un leve incremento debido a las propiedades de desecación de las sales sobresaturadas, a diferencia de la zona de alta actividad de agua donde la humedad incrementa considerablemente mostrando la capacidad higroscópica en las multicapas de la matriz de estudio.

- Los datos experimentales de secado ajustados a seis modelos matemáticos referenciales presentaron resultados similares, con diferencias pequeñas en las constantes k, n, b, y a, las cuales son importantes para conocer el proceso de secado. Sin embargo, el modelo logarítmico presentó el valor más alto en el coeficiente de determinación (r^2) con un error cuadrático medio muy alto, debido a esta limitante se determina que el modelo de Page el que es el segundo modelo con el coeficiente de determinación (r^2) más alto, con el error cuadrático medio más bajo, es el mejor para describir el proceso de secado de la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

- Los datos experimentales de la isoterma de adsorción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) ajustados a dos modelos matemáticos específicos de GAB y BET demuestran que el modelo de BET tiene el coeficiente de determinación (r^2) más alto, es decir presenta un mejor ajuste a los datos experimentales, y se refleja una precisión en el comportamiento, por tanto, es el que se recomienda aplicar para futuras investigaciones en esta matriz alimentaria. También cabe resaltar que el valor de (k) en el modelo de GAB es importante para conocer el comportamiento de adsorción en las multicapas.

4.2 Recomendaciones

- Se sugiere utilizar más temperaturas entre (40 °C – 70 °C) de secado en la misma matriz vegetal para evidenciar la existencia de cambios sustanciales en los datos experimentales.

- Usar diferentes modelos matemáticos para describir la cinética de secado como también para el análisis de la isoterma de adsorción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHIPIA. (2020). *RECOMENDAICONES para el lavado y desinfección de frutas y verduras*. https://www.achipia.gob.cl/wp-content/uploads/2020/05/RECOMENDACIONES-PARA-DESINFECCION-DE-FRUTAS-Y-VER-4.pdf

Acurio, L., Baquerizo, A., Borja, A., Vayas, M., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2023). Water-Sorption Isotherms and Air-Drying-Kinetics Modelling of Andean Tubers and Tuberous Roots. *Biology and Life Sciences Forum*, 71. https://doi.org/10.3390/foods2023-15141

Agama Naranjo, A. (2018). *Estudio de las condiciones óptimas de almacenamiento de papilla para niños de 6 a 36 meses a base de harina de papa nativa (Solanum tuberosum ssp.), variedades Yema de Huevo y Santa Rosa con sabor a mora (Rubus glaucus) y taxo (Passiflora tripartita).* [Universidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27135/1/AL%20656.pdf

Ahmed, M. W., Aziz, M. G., & Islam, M. N. (2018). Modeling of Moisture Adsorption Isotherm of Selected Commercial flours of Bangladesh. *The Agriculturists*, *16*(02), 35–42. https://doi.org/10.3329/agric.v16i02.40341

Ahmed, N., Ali, A., Riaz, S., Ahmad, A., & Aqib, M. (2022). Vegetable Proteins: Nutritional Value, Sustainability, and Future Perspectives. In *Vegetable Crops - Health Benefits and Cultivation*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.100236

Andrade, R., Lemus, R., & Pérez, C. (2011). Models of sorption isotherms for food : Uses and limitations. *Vitae*, *18*, 325–334. https://www.redalyc.org/pdf/1698/169822677013.pdf

Anria, M., González, A., & Quintero, R. (2019). Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias deshidratadas. *I+D Tecnológico*, *15*(1), 17–23. https://doi.org/10.33412/idt.v15.1.2093

Appenroth, K. J., Sowjanya Sree, K., Bog, M., Ecker, J., Seeliger, C., Böhm, V., Lorkowski, S., Sommer, K., Vetter, W., Tolzin-Banasch, K., Kirmse, R., Leiterer, M., Dawczynski, C., Liebisch, G., & Jahreis, G. (2018). Nutritional value of the duckweed species of the Genus Wolffia (Lemnaceae) as human food. *Frontiers in Chemistry*, *6*. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00483

Bennett, C. (2024). *Influencia del pH en la adsorción del cromo hexavalente en distintos* [Universidad de Cuenca]. https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/44376/1/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf

Bistoni, S., Iriarte, A., García, V., & Calahorra, M. (2016). Analisis del secado de pimiento (Capsicum annuum L.). En chilecito, La rioja. Aportes para la apropiación de tecnología solar. *Revista Del CIZAS*, *16*(17). https://agrarias.unca.edu.ar/wp-

content/uploads/2018/Revista%20del%20CIZAS/16%20y%2017/2.%20bis%20An%C3%A1lisis%20sec.%20pim.%20Bistoni.pdf

Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Neves-Martins, M. J., dos Santos, P. A., Luna-Solano, G., & Telis-Romero, J. (2024). Water desorption isotherms and thermodynamic properties of Ora-pro-nóbis (Pereskia aculeata Miller). *LWT*, *193*. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115749

Bouzenada, S., Kaabi, A. N., Frainkin, L., Salmon, T., & Léonard, A. (2016). Experimental Comparative Study on Lithium Chloride and Calcium Chloride Desiccants. *Procedia Computer Science*, *83*, 718–725. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.159

Burnand, M. (2023). Traditional ingredient or sustainable superfood? Awareness and consumption of duckweed in Laos and Thailand [Wageningen University & Research]. In *Technology and Innovation*. https://edepot.wur.nl/639154

Buzrul, S. (2022). Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. *Processes*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/pr10010118

Cabascango, O. (2018). Manual de deshidratación. *Universidad Técnica Del Norte*. https://www.ppd-ecuador.org/wp-content/uploads/2019/FondoBecas/SierraNorte/UTN-Omar-Uso-Deshidratador-solar-vf.pdf

Calabrese, M., & Ferranti, P. (2018). Novel foods: New food sources. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 271–275. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22128-8

Carteri, P., De Castro, E., & Pereira, R. (2014). Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon grass (Cymbopogon citratus Stapf) and its effects on quality. *SCIELO*, *32*. https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v32n4/art06.pdf

Compeer, A. E., & De Best, J. H. (2018). *Report Blauwe Keten: Applications of proteins, amino acids and starch from duckweed*. https://www.mnext.nl/app/uploads/2019/03/Report-Applications-of-Duckweed.pdf

Da Rocha, R. P., De, E., Melo, C., Corbín, J. B., Berbert, P. A., Donzeles, S. M. L., & Tabar, J. A. (2012). Cinética del secado de tomillo (Thymus vulgaris L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *16*. https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/RQ6WcQdbdmSxfNgX5FgS9dL/?format=pdf&lang=es

Durán, J., & Rodríguez, D. (2021). *Diseño, control y simulación de una cámara deshidratación para la empresa de fideos y tallarines "Rica Pasta."* Ùniversidad Politécnica Salesiana .

Flores, G. (2019). *Determinación experimental de la cinética de secado de especias amazónicas (Allium schoenoprasum, Eryngium foetidum, Mansoa allicea L)* [Universidad Estatal Amazónica].

https://repositorio.uea.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/714/T.AGROIN.B.UEA.0080.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gamarra, R. (2019). *Efecto de la temperatura de secado y las condiciones de almacenamiento sobre la calidad organoléptica de la harina de lúcuma (Pouteria lucuma) tipo seda* [Universidad San Ignacio de Loyola]. https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/bbaa52b2-78e7-4a5d-a5d9-080b24ca0344/content

García, M. E., Moreta, T., Guerrero Luzuriaga, S. A., & Gaibor Chávez, J. (2023). Modelamiento matematico de la cinética de secado de café robusta (Coffea canephora). *Bionatura*, *8*(4), 1–8. https://doi.org/10.21931/rb/2023.08.04.10

Giraldo, A., Arévalo, A., Silva, A., Silva, P., Valdes, J., & Menezes, M. (2008). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas. *Ciênc. Tecnol. Aliment*, *30*(1), 179–182. https://www.scielo.br/j/cta/a/HT4CM6wN7jD9Wnh7kSSHyhF/?format=pdf

Guzmán-Hincapié, J. C., & Zapata, J. E. (2018). Thermodynamics properties and sorption isotherms on salts of food interest. *Informacion Tecnologica*, *29*(3), 105–120. https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300105

Hernández, Y., García, A., & Vega, M. (2021). Isoterma de adsorción de moléculas de agua en hojas secas de Justicia pectoralis Jacq. (tilo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, *24*(4). https://orcid.org/0000-0002-6495-6920

Honorable Consejo Provincial de Tungurahua. (2024). *Red Hidrometeorológica de Tungurahua* . Boletines Hidrometeorológicos. https://rrnn.tungurahua.gob.ec/red/promedios_mensuales

Iglesias, R., Grimaldi, R., Villanueva, B., Hernández, J., López, P., & Lastres, O. (2018). Cinética de secado de Moringa oleifera. *SCIELO*. https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v9n5/2007-0934-remexca-9-05-935.pdf

Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, *08*(02), 27–48. https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003

Khaloahmadi, A., Roustapour, O., & Farzaneh, B. (2023). Mathematical Modeling of Drying Food Waste in Cabinet Dryer with Conventional Tray *1. *Food Technology Research Journal*, *2*, 75–81. https://ftrj.journals.ekb.eg/article_317187_a242500040e76dd11435547a2fdd3128.pdf

Lam, E., Appenroth, K., Ma, Y., & Shoham, T. (2021). Duckweed Forum. *ISCDRA*, *9*(35). http://www.ruduckweed.org/uploads/1/0/8/9/10896289/duckweed_forum_issue_35.pdf

López-Mejía, N., Andrade-Mahecha, M. M., & Martínez-Correa, H. A. (2019). Mathematical modeling of spaghetti drying kinetics enriched with dehydrated squash pulp (Cucurbita moschata). *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, *22*(1). https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1151

Lozada, D. F. G., Oña, G. E. C., & Chavez, A. F. M. (2021). Drying Kinetics of Oca (Oxalis Tuberosa). *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, *1*(5). https://doi.org/10.18502/espoch.v1i5.9573

Maygualema, R., Cerda, G., Ríos, J., & Cerda, V. (2023). Evaluación de la eficiencia de un sistema de secado solar directo para granos de cacao en Tena. *SCIELO*. http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v50n3/2223-4861-caz-50-03-e1034.pdf

Méndez, I., Rodríguez, N., & Tejeda, E. (2018). *La Humedad en La Atmósfera Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf

Morsetto, J., Lema, A., Pontin, M., & Paisio, G. (2008). Estudio preliminar sobre la cinética de secado para perejil en condiciones de secado solar. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, *12*. https://core.ac.uk/download/pdf/322675357.pdf

Mukherjee, K., & Fattori, V. (2022). New food sources and food production systems: Exploring the food safety angle. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. https://www.fao.org/3/cc1601en/cc1601en.pdf

Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. V. (2023). A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. In *ACS Omega* (Vol. 8, Issue 20, pp. 17407–17430). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155

Nilnont, W., Phitakwinai, S., & Thawichsri, K. (2015). Thin-layer Drying Kinetics of Robusta Coffee. *The International Journal of Advanced Culture Technology*, *3*(2), 138–143. https://doi.org/10.17703/ijact.2015.3.2.138

Oyerinde AS. (2016). Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato (Lycopersicon esculentum Mill) Slices under Direct Sun and Air Assisted Solar Dryer. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, *3*(5). https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0305015.pdf

Padilla, K., Conde, C., Méndez, G., Pineda, Y., & Alarcón, M. (2018). Evaluación de la influencia de la temperatura en el proceso de secado. *Limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, *16*(1). https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/ALIMEN/article/viewFile/3935/2152

Pantoja-Tirado, L., Prieto-Rosales, G., & Aguirre, E. (2020). Caracterización de la harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y la harina de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet) para su industrialización. *TAYACAJA*, *3*(1). https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.72

Parikh, D. (2014). Solids Drying: Basics and Applications. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/283088778

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (2008). SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Agriambi*, *12*(4), 415–427. https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/TZ7Sqw8RqZKny4fZh6dHW6j/

Pergher, G., Schmalko, M. E., & De Battista, G. A. (2016). Parámetros Fisicoquímicos e Isotermas de Adsorción de Hojas de Especies Silvestres de Maytenus ilicifolia Martius. *SCIELO*, *25*. http://www.scielo.org.ar/pdf/recyt/n25/n25a04.pdf

Puente-Díaz, L., Echegaray-Pacheco, E., Castro-Montero, E., & Scala, K. Di. (2013). APPLICATION OF MATHEMATHICAL MODELS TO INFRARED ASSISTED DRYING PROCESS OF LEMON WASTE (Citrus limon (L.) Burm. F. Cv. Genova). *Dyna*, *80*, 91–97. https://www.redalyc.org/pdf/496/49628728010.pdf

Ruiz, L. (2016). *Diseño de un secador de bandejas para la deshidratación de plátano en la parroquia Veracruz del cantón Pastaza* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/5677/1/96T00337.pdf

San Martín, Á. (2020). Isotermas de sorción en alimentos. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/359006570_Isotermas_de_sorcion_en_alimentos

Sarvestani, F. S., Rahimi, A., & Hatamipour, M. S. (2014). An experimental study on drying characteristics and kinetics of figs (Ficuscarica). *Polish Journal of Chemical Technology*, *16*(4), 60–65. https://doi.org/10.2478/pjct-2014-0071

Schneider, B., Hadad, H. R., & Rodriguez, E. E. (2021). *Plantas acuáticas del río Paraná Medio*.

Silva, R., Mendoza, M., Sota, A., & Della Rocca, P. (2022). Secado de hojas de muña (minthostachys mollis): Modelado, cinética y propiedades termodinámicas. *Enfoque UTE*. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.827

Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 62, pp. 194–201). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.003

Squeo, F. A., & León, M. F. (2007). Transpiración. *Ediciones Universidad de La Serena*, *3*, 67–84. https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf

Taheri-Garavand, A., & Meda, V. (2018). Drying kinetics and modeling of savory leaves under different drying conditions. *International Food Research Journal*, *25*(4), 1357–1364. http://www.ifrj.upm.edu.my/25%20(04)%202018/(5).pdf

Talens Oliag, P. (2020). *Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento*. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83506/Talens%20-%20Determinaci%C3%B3n%20de%20la%20isoterma%20de%20sorci%C3%B3n%20de%20agua%20un%20alimento.pdf?sequence=1

Turan, O. Y., & Firatligil, F. E. (2019). Modelling and characteristics of thin layer convective air-drying of thyme (Thymus vulgaris) leaves. *Czech Journal of Food Sciences*, *37*(2), 128–134. https://doi.org/10.17221/243/2017-CJFS

UnADM. (2020). *Operaciones Unitarias II*. https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE1/BI/06/BOU2/unidad_02/descargables/BOU2_U2_Contenido.pdf

Valle, M., Durán, R., Alean, J., & Ciro, H. (2020). Drying Kinetics of Organic Parchment Coffee Beans (Coffea Arabica L.) Using a Fluidised Bed: a Semi Theoretical Microwave Modeling. *Revistas Udem*. https://doi.org/https://dpi.org/10.22395/rium.v20n39a10

Vega, A., Tello, C., & Lemus, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria Chilena (Gracilaria chilensis). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *15*(1), 55–64. https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n1/Art08.pdf

Vega Gálvez, A., Ireland, C. T., & Lemus Mondaca, R. (2007). SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE SECADO DE LA GRACILARIA CHILENA (GRACILARIA CHILENSIS). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *15*(1), 55–64. https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n1/Art08.pdf

Velásquez, M. (2007). *Estandarización del Proceso de Secado de Carragenina en la Empresa Extractos Naturales Gelymar S.A* . Universidad Austral de Chile.

Verma, S., Usenov, A. B., Sobirova, D. U., Sultonova, S. A., & Safarov, J. E. (2022). Mathematical description of the drying process of mulberry leaves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1112*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012012

Worch, E. (2012). *Adsorption Technology in Water Treatment*. https://elibrary.poltekkeskendari.ac.id/repository/2e88fb17524c485f9f38822a51915552.pdf

Xu, J., Shen, Y., Zheng, Y., Smith, G., Sun, X. S., Wang, D., Zhao, Y., Zhang, W., & Li, Y. (2021). Duckweed (Lemnaceae) for potentially nutritious human food: A review. *Food Reviews International*, 1–16. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012800

Yahaya, N., Hamdan, N. H., Zabidi, A. R., Mohamad, A. M., Suhaimi, M. L. H., Johari, M. A. A. M., Yahya, H. N., & Yahya, H. (2022). Duckweed as a future food: Evidence from metabolite profile, nutritional and microbial analyses. *ELSEVIER*. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100128

Zaheer, Z., AbuBaker Bawazir, W., Al-Bukhari, S. M., & Basaleh, A. S. (2019). Adsorption, equilibrium isotherm, and thermodynamic studies to the removal of acid orange 7. *Materials Chemistry and Physics*, *232*, 109–120. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.04.064