



**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 agua de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

---

Informe final de Integración Curricular, modalidad Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación interinstitucional entre la Universidad Técnica de Ambato y la Universidad Politécnica de Valencia: “Valorización de tubérculos andinos para la obtención de ingredientes alimentarios y su viabilidad. Concienciación de su valor nutritivo y funcional”, coordinado por Liliana Acurio, M.Sc. UTA-CONIN-2022-0269-R

**Autora:** Alexandra Daniela Borja Suárez

**Tutora:** M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

**Ambato - Ecuador**

**Marzo 2023**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

### **CERTIFICA**

Que el presente informe final de integración curricular ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final de Integración Curricular bajo la modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 8 de febrero de 2023.

---

Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I. 1804067088

**TUTOR**

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Alexandra Daniela Borja Suárez, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final de Integración Curricular, bajo la modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales, a excepción de las citas bibliográficas.



---

Alexandra Daniela Borja Suárez

C.I. 0202151130

**AUTORA**

## **APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO**

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe final de Integración Curricular, modalidad 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 constancia firman:

---

Presidente del tribunal

---

Dr. Santiago Esmiro Cadena Carrera  
C.I. 1715602593

---

Mg. Daniel Alfonso Cabrera Valle  
C.I. 1802561595

Ambato, 06 de marzo del 2023

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final de Integración Curricular o parte de él, un documento disponible para su lectura y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final de Integración Curricular, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



---

Alexandra Daniela Borja Suárez

C.I. 0202151130

**AUTORA**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios por darme sabiduría, inteligencia y fuerzas luchar por mis sueños. Estoy segura de que sin su guía no lo habría logrado.*

*A mis padres por su apoyo incondicional, por inculcarme valores y principios que me han permitido alcanzar mi crecimiento personal y profesional.*

*A mi hermana por ser mi apoyo en todo momento y mi respaldo cuando más lo he necesitado, esto es gracias a ella.*

*A Josué Elías mi sobrino, por pintarme la vida de colores y por ser mi motivo para seguir luchando.*

**Alexandra Daniela**

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por abrirme las puertas para formarme académicamente y así cumplir este sueño tan anhelado.*

*A la Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos, por su paciencia y capacidad para impartir sus conocimientos, ya que ha sido mi principal apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.*

*Al proyecto de investigación interinstitucional entre la Universidad Técnica de Ambato y la Universidad Politécnica de Valencia: “Valorización de tubérculos andinos para la obtención de ingredientes alimentarios y su viabilidad. Concienciación de su valor nutritivo y funcional”. Y a los investigadores asociados al mismo, quienes me han permitido formar parte de este excelente grupo.*

*A mi familia por ser mi fortaleza, mi apoyo y mi motor para seguir adelante a pesar de las dificultades, porque de ellos aprendí a no rendirme.*

*A las personas a quienes conocí a lo largo de estos años, ya que han sido mi ayuda en momentos difíciles.*

**Alexandra Daniela**

## ÍNDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO .....	iv
DERECHOS DE AUTOR .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I .....	1
MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1. Justificación .....	1
1.1.2. Fundamentación científico-técnica .....	2
1.1.2.1. Tubérculos andinos .....	2
1.1.2.2. Importancia de los tubérculos andinos.....	4
1.1.2.3. Oca ( <i>Oxalis tuberosa</i> ) .....	4
a. Variedades de ocas.....	4
b. Valor nutricional de la oca blanca.....	5
c. Endulzado de la oca blanca.....	5
d. Cambios fisicoquímicos de la oca endulzada mediante secado solar .....	6
1.1.2.4. Origen de la zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> ).....	6
a. Descripción de la zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> ) .....	6
b. Composición nutricional.....	7
1.1.2.5. Almacenamiento .....	7
1.1.2.6. Secado.....	7
a. Parámetros del proceso de secado.....	7
1.1.2.7. Curvas de secado.....	8
1.1.2.8. Cinética de secado.....	8
1.1.2.9. Isotermas de adsorción.....	9
1.2. Objetivos.....	10
1.2.1. Objetivo General .....	10
1.2.2. Objetivos Específicos.....	10



CAPÍTULO II.....	11
METODOLOGÍA.....	11
2.1. Materia prima.....	11
2.2. Secado.....	11
2.3. Humedad.....	11
2.4. Modelado matemático de la cinética de secado.....	11
2.5. Isotermas de adsorción de agua.....	12
2.6. Cálculo de la humedad de equilibrio.....	13
2.7. Modelado de las isotermas de adsorción.....	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
3.1. Humedad y actividad de agua de la oca blanca y zanahoria blanca.....	15
3.2. Curvas de cinética de secado.....	15
3.2.1. Oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	16
3.2.2. Zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	17
3.3. Curvas de velocidad de secado.....	18
3.3.1. Oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	18
3.3.2. Zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	19
3.4. Modelos matemáticos de curvas de secado.....	20
3.4.1. Correlación de los datos de las curvas de cinética de secado de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	20
3.4.2. Correlación de los datos de las curvas de cinética de secado de zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	24
3.5. Isoterma de adsorción de harina de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	28
3.6. Isoterma de adsorción de harina zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	29
3.7. Comparación de las isotermas de adsorción de harina de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca) y zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	30
3.8. Correlación de los datos de las curvas de isoterma de adsorción de harina de Oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	31
3.9. Correlación de los datos de las curvas de isoterma de adsorción de harina de zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	33
CAPÍTULO IV.....	34

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
4.1. Conclusiones.....	34
4.2. Recomendaciones .....	35
BIBLIOGRAFÍA .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de las principales variedades de oca en Ecuador.....	5
<b>Tabla 2.</b> Ecuaciones utilizadas en el modelado de la cinética de secado.....	12
<b>Tabla 3.</b> Sales utilizadas como factor higroscópico.....	13
<b>Tabla 4.</b> Ecuaciones utilizadas para el modelado de las isothermas de adsorción.....	14
<b>Tabla 5.</b> Humedad y actividad de agua de la oca blanca y zanahoria blanca, antes y después del proceso.....	15
<b>Tabla 6.</b> Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de oca blanca.....	23
<b>Tabla 7.</b> Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de zanahoria blanca.....	27
<b>Tabla 8.</b> Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos GAB y BET para oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	32
<b>Tabla 9.</b> Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos GAB y BET para zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.).....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tubérculos andinos.....	3
<b>Figura 2:</b> Curvas de secado.....	9
<b>Figura 3:</b> Curvas de secado.....	9
<b>Figura 4.</b> Curva experimental de secado de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	16
<b>Figura 5.</b> Curva experimental de secado de zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.) .....	17
<b>Figura 6.</b> Curva de velocidad de secado de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca)....	19
<b>Figura 7.</b> Curvas de velocidad de secado de zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.) .....	20
<b>Figura 8.</b> Curvas de secado del modelado matemático de oca blanca .....	22
<b>Figura 9.</b> Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page .....	24
<b>Figura 10.</b> Curvas de secado del modelado matemático de zanahoria blanca .....	26
<b>Figura 11.</b> Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page .....	28
<b>Figura 12.</b> Curva experimental de isoterma de adsorción de oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca).....	29
<b>Figura 13.</b> Curva experimental de isoterma de adsorción de zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.) .....	30
<b>Figura 14.</b> Isoterma de adsorción de harina oca blanca ( <i>Oxalis tuberosa</i> variedad Blanca) y zanahoria blanca ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.) .....	31

## RESUMEN

El presente trabajo se enfocó en el estudio de la cinética de secado de oca blanca y zanahoria blanca, proceso llevado a cabo a una temperatura de 65 grados centígrados durante 8 horas. La determinación de la humedad crítica arrojó los valores de 0,06 kg agua/kg sólido seco y 0,07 kg agua/kg sólido seco para oca blanca y zanahoria blanca, respectivamente. Además, los datos de cinética se ajustaron a los modelos matemáticos de: Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Logarítmico, Thomson, y Fick. Por medio del coeficiente de determinación, el error medio estimado y el porcentaje de desvío medio relativo, se determinó que el modelo de Page presentó un mejor ajuste.

Por otra parte, se construyeron las isotermas de adsorción, utilizando sales sobresaturadas que permitieron mantener ambientes con una humedad relativa en un rango de 11 a 80 por ciento. Las isotermas mostraron una forma sigmoideal de tipo II y los valores fueron ajustados a los modelos matemáticos de GAB y BET. Por medio del coeficiente de determinación se determinó un mejor ajuste con el modelo de GAB. El contenido de humedad de la monocapa para las dos matrices arrojó valores de 0,055 kg agua/kg sólido seco y 0,057 kg agua/kg sólido seco para oca blanca y zanahoria blanca, respectivamente. Esta constante se relaciona con el límite de humedad que la muestra debe tener para permanecer estable durante el almacenamiento.

**Palabras claves:** Secado, isotermas de adsorción, oca blanca, zanahoria blanca, modelos matemáticos

## ABSTRACT

The present work focused on studying the drying kinetics of oca blanca and zanahoria blanca in a drying process carried out at a temperature of 65 degrees Celsius for 8 hours. The determination of the critical humidity yielded the values of 0.06 kg<sub>water</sub> per kg<sub>dry solid</sub> and 0.07 kg<sub>water</sub> per kg<sub>dry solid</sub> for oca blanca and zanahoria blanca, respectively. In addition, the kinetics data were fitted to the mathematical models of Newton, Page, modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Thomson, and Fick. Through the determination coefficient, the estimated mean error, and the relative mean deviation percentage, it was determined that the Page model presented a better fit.

On the other hand, the adsorption isotherms were built using supersaturated salts, allowing them to maintain environments with a relative humidity of 11 to 80 percent. The isotherms showed a type II sigmoidal shape, and the values were fitted to the GAB and BET mathematical models. Through the coefficient of determination, a better fit with the GAB model was determined. The monolayer moisture content for the two matrices yielded values of 0.055 kg<sub>water</sub> per kg<sub>dry solid</sub> and 0.057 kg<sub>water</sub> per kg<sub>dry solid</sub> for oca blanca and zanahoria blanca, respectively. This constant is related to the humidity limit that the sample must have to remain stable during storage.

**Keywords:** Drying, adsorption isotherms, oca blanca, zanahoria blanca, mathematical models

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes investigativos

#### 1.1.1. Justificación

La oca y la zanahoria blanca presentan un alto valor nutricional, por ende, son considerados como alimentos indispensables por las personas de las comunidades rurales de la zona andina (Gonzales Cabrera, 2016). Estos tubérculos una vez cosechados son conservados a temperatura ambiente y suelen mantener su estado durante 14 días (Hanco Zaga & Mamani Ordoñez, 2017). Son considerados muy perecederos, ya que una vez transcurrido este tiempo se pueden evidenciar cambios en sus características físicas, siendo la contaminación microbiana la causa principal de deterioro debido al alto contenido de agua (Coral Torres, 2014; Restrepo de Peña, Sierra Borrás, & Suárez Suárez, 2017).

Por otra parte, actualmente existe una gran necesidad de disponer alimentos de consumo inmediato, lo cual ha inducido a la búsqueda de procesos tecnológicos que permitan conservar sus características nutricionales y prolongar su vida útil (Agama Naranjo, 2018). Dentro de estos procesos se encuentra el secado que ha sido ampliamente utilizado en la industria alimentaria, ya que permite obtener productos con bajo contenido de humedad y actividad de agua, lo cual retarda el desarrollo microbiano y la generación de reacciones enzimáticas (Padilla Frías, Granados Conde, Leon Mendez, Arrieta Pineda, & Torrenegra Alarcon, 2020).

En un estudio realizado por Magdalini & Zacharias, citado por Padilla Frías et al. (2020), se menciona que las temperaturas altas en el proceso de secado provocan cambios en el aspecto fisicoquímico y nutricional del alimento. Por otra parte, según Hanco Zaga y Mamani Ordoñez (2017), someter el alimento a temperaturas muy elevadas causa cambios indeseables, alteraciones en las propiedades fisicoquímicas, cambios en la textura, color, encogimiento de su estructura y pérdida de propiedades nutricionales.

Por lo antes expuesto es necesario construir curvas que evalúen la cinética de secado, ya que éstas permiten controlar y estandarizar el tiempo y la temperatura de proceso, así como la humedad final para que el producto sea alterado lo mínimo posible. El modelado matemático del proceso de secado permite estimar el tiempo necesario en el que se reduce la humedad en un alimento, hasta valores considerados como estables. Para esto se emplean ecuaciones empíricas para optimizar el proceso, siendo los modelos más utilizados de Newton, Logarítmico, Henderson y Pabis, Thomson, Page y Fick (Ayensu, 1997; Fick, 1855; Henderson & Pabis, 1961; Page, 1949; Thompson, Peart, & Foster, 1968). Todos los modelos permiten controlar y optimizar el proceso, así como también determinar el contenido de humedad del alimento al finalizar el proceso de secado (Gutiérrez Mosqueraa et al., 2015; Vega & Lemus, 2006).

Por otro lado, la construcción de las isotermas de adsorción aporta información del equilibrio entre la actividad de agua y la humedad a temperatura constante (Gamarra Castro, 2019). Para el ajuste de los datos experimentales de la isoterma de adsorción se emplea los modelos matemáticos de GAB, definido por Van den Berg y Bruin (1978), y BET definido por Brunauer, Emmett, y Teller (1938), los cuales permiten analizar la estabilidad de los productos deshidratados en condiciones de almacenamiento (Agama Naranjo, 2018).

Considerando lo mencionado anteriormente, y de acuerdo con los requerimientos de la industria, el presente estudio se enfocará en modelar la cinética de secado e isoterma de adsorción de agua de harinas obtenidas a partir de los tubérculos andinos: oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.), con la finalidad de optimizar el proceso de secado y evaluar la estabilidad del producto.

## **1.1.2. Fundamentación científico-técnica**

### **1.1.2.1. Tubérculos andinos**

Los tubérculos andinos se desarrollan en la región andina a alturas superiores a los 3000 m de altitud. Historiadores mencionan que existen alrededor de 4000 variedades de tubérculos andinos, de los cuales destacan la oca y la papa



andina; además, por medio del cruzamiento de especies tuberosas hoy en día existe un gran número de especies. De manera general la mayoría de ellos presentan formas alargadas, redondas y ovaladas (Figura 1). Así mismo, presentan colores de pulpa que van desde tonalidades blancas, amarillas, naranjas y hasta moradas (Lotufo Haddad, 2019).

Según García Díaz et al. (2018), los tubérculos andinos son cultivos muy reconocidos a nivel mundial debido a su gran variedad y sus potenciales beneficios a la salud. Sin embargo, en la actualidad se ha observado una disminución del área de cosecha debido a una reducción de su consumo. Realizando un análisis simple se puede destacar que la base de esta tendencia es el desconocimiento de las propiedades nutricionales y de industrialización que presentan estos cultivos. En Ecuador los tubérculos andinos tienen gran importancia en las zonas andinas rurales, ya que se los usa tanto para su consumo, como para la venta (Vinces Alvear & Cabezas Noboa, 2022).



**Figura 1.** Tubérculos andinos

**Fuente:** Vincés Alvear y Cabezas Noboa (2022)

### **1.1.2.2.Importancia de los tubérculos andinos**

De acuerdo con la Food y Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018), la importancia de los tubérculos andinos radica en:

- Los beneficios que brindan gracias a su aporte nutricional de proteínas, vitaminas, fibra, minerales y energía,
- No se requieren costos elevados para su cultivo,
- Soportan climas extremos, como sequías prolongadas,
- Permiten obtener ingresos económicos a través de su comercialización, ayudando a la economía campesina, y
- Favorece al desarrollo de la agroindustria.

### **1.1.2.3.Oca (*Oxalis tuberosa*)**







La oca se cultiva a una altura de entre 2300 y 3000 msnm y soporta climas fríos. Esta planta produce tubérculos con sabores dulces y ricos en almidón. En Ecuador se cultiva en las provincias de Tungurahua, Imbabura, Chimborazo y Cotopaxi (Orbe Burbano, 2020; Sánchez Castro, 2022).

La planta presenta pequeños pelos en sus tallos, las hojas tienen forma de trébol y no presenta muchas inflorescencias; es decir presentan una única flor. La presencia de tubérculos se da a partir de los 110 días después de haberse dado la germinación, y los tubérculos miden de 5 a 15 cm de largo y presentan ojos en su estructura (Apaza Morocco, 2018).

#### **a. Variedades de ocas**

Existen 50 variedades de este cultivo, de las cuales en Ecuador se conocen tres: blancas (albas), amarillas (flavas) y rojas (roseas) (Tabla 1). Los tubérculos en estas variedades presentan formas ovoides, alargadas, cilíndricas y claviformes, con presencia de ojos y hendiduras oscuras en su exterior (Apaza Morocco, 2018).

**Tabla 1.** Características de las principales variedades de oca en Ecuador

Clasificación	Característica	Variedad
Blanca (albas)	Se diferencian principalmente por tener la pulpa y cáscara de color blanco.	 Pi
Amarillas (flavas)	Presentan un color amarillento claro, amarillo intenso o pigmentos anaranjados.	 Zapallo oca
		 Bola kamusa
Rojas (roseo violáceo)	Presentan una pigmentación rosa claro o violeta oscuro debido a la presencia de antocianinas	 K'ellu Gayara
		 Lluch'u Oca
		 Titcoma oca

**Fuente.** Sánchez Castro (2022)

### b. Valor nutricional de la oca blanca

El aporte nutricional de la oca depende de la variedad debido a que cada una presenta un contenido nutricional distinto. Según estudios se conoce que esta variedad contiene aproximadamente una humedad del 80 %; proteína 1.1 % y carbohidratos 13 % (compuesto por almidón y azúcares); además presenta una cantidad considerable de vitamina A (Retinol) y es una fuente importante de vitamina C. El consumo de 100 gramos de este alimento brinda un aporte de 20 a 60 kcal (Gualoto Lata, 2021).

### c. Endulzado de la oca blanca

El tubérculo se expone al sol, de forma tradicional, por un período de 5 a 12 días con el objetivo de disminuir el efecto amargo e incrementar el contenido de azúcares por medio de la transformación de almidón.

Generalmente se emplean 3 técnicas de secado:

- Técnica tradicional o sometimiento de los tubérculos directamente al sol,
- Secador solar de madera cubierto con cuatro paneles de vidrio transparente y con puertas laterales de malla, y
- Silos tecnificados que permiten evaluar la pérdida de peso, acidez, materia seca, entre otras propiedades (Sánchez Castro, 2022).

#### **d. Cambios fisicoquímicos de la oca endulzada mediante secado solar**

Los cambios fisicoquímicos más importantes son:

- Pérdida de peso, mientras mayor es el tiempo de exposición de la oca al sol, mayor es la pérdida de peso del tubérculo,
- Aumento de la materia seca debido a la disminución de humedad,
- Variación de la acidez titulable, dependiendo del estado de madurez,
- Aumento de los azúcares totales, mientras mayor es el tiempo de exposición del tubérculo al sol, mayor va a ser el incremento de azúcares en la oca. Esto se debe a la transformación del almidón en azúcares, y
- Evolución de daños físicos como estructura arrugada, oscura y dura, lo que afecta a la apariencia y calidad.

#### **1.1.2.4. Origen de la zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)**

La zanahoria blanca es el tubérculo más cultivado alrededor del mundo. Fue domesticada en las regiones de Perú, Colombia y Ecuador. Estudios afirman que los Incas fueron los primeros en dedicarse al cultivo de zanahoria blanca. En Ecuador el cultivo de zanahoria blanca se desarrolla en las provincias de Imbabura, Pichincha, Tungurahua, Loja y El Oro (Montesdeoca Chiriboga & Sandiford Lema, 2022).

##### **a. Descripción de la zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)**

Según Jordán Villamar (2018) y Orbe Burbano (2020), la zanahoria alcanza una altura de entre 0,50 a 150 cm. Sus hojas son largas en forma de vainas y en la parte inferior se desarrollan los tubérculos que tienen varias formas: cónicas, ovoides y fusiformes. Éstos tienen una longitud de 8 a 20 cm y un diámetro de 3 a 8 cm.

## **b. Composición nutricional**

La zanahoria blanca no solo presenta un excelente sabor, sino que también posee un alto valor nutricional. Este tubérculo se destaca por su alto contenido de carbohidratos, fibra, calcio y vitaminas como la A, E, D y K. Es fácil de digerir ya que presenta un almidón fino (Jordán Villamar, 2018; Orbe Burbano, 2020).

### **1.1.2.5. Almacenamiento**

Debido a que los tubérculos andinos una vez cosechados son propensos a daños físicos con el pasar del tiempo, la industria alimentaria se ha preocupado por el aprovechamiento de estas materias primas. Por medio de la industrialización se ha logrado obtener harina para la elaboración de otro tipo de alimentos. Las harinas son alimentos de fácil almacenamiento ya que presentan una humedad de aproximadamente 5 a 7%, lo cual evita el deterioro por microorganismos y prolonga su vida útil (Meneses Mariño, 2021).

### **1.1.2.6. Secado**

El secado es un método muy empleado en la industria alimentaria para reducir la humedad de los alimentos hasta llegar a un nivel óptimo en el que el alimento no sufra descomposición. Esta tecnología provoca varios cambios físicos en la estructura del alimento, como reducción de peso y volumen, favorece el transporte y manejo, y aumenta el tiempo de conservación y estabilidad (Noroña Gamboa, 2018).

#### **a. Parámetros del proceso de secado**

Dentro de los parámetros más importantes del proceso de secado se pueden citar:

- Humedad promedio, porcentaje de humedad en base seca que posee un alimento expresado en cantidad de agua frente a cantidad de sólido seco.
- Humedad de equilibrio, todo alimento tiene su estado de equilibrio entre la humedad y el vapor de agua en el aire; la humedad del alimento se transporta al aire o viceversa, hasta llegar a alcanzar el estado de equilibrio.
- Humedad crítica, humedad que se sitúa en un punto entre el período de velocidad de secado constante y decreciente; es el tiempo en el que en la curva de secado existe una variación del comportamiento lineal de secado.

### **1.1.2.7. Curvas de secado**

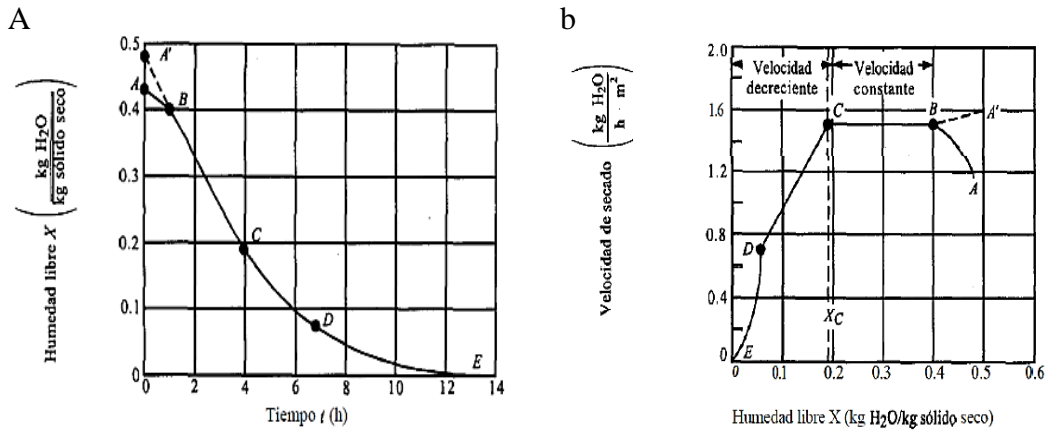
En el proceso de secado, la velocidad de transferencia de calor y masa tiene gran influencia, ya que el contenido de humedad se reduce y esto tiene una implicación estructural importante. Además, este proceso se ve afectado por parámetros como el tipo de secador, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de equilibrio, velocidad de aire, entre otros. Para construir estas curvas de secado, las muestras son colocadas en un secador y se determina la pérdida de peso a ciertos intervalos de tiempo predefinidos (Noroña Gamboa, 2018).

### **1.1.2.8. Cinética de secado**

Para determinar la cinética de secado se colocan las muestras en un secador y se evalúa la pérdida de peso bajo ciertos intervalos de tiempo. Debido a que el proceso de secado es una operación unitaria compleja y difícil de predecir (por los fenómenos que se dan en el interior y exterior de un alimento), es necesario optimizar el proceso mediante el control y estandarización de la velocidad, tiempo y temperatura de proceso. Es precisamente en esta estandarización en donde el conocer la cinética de secado juega un papel importante (Chigal, Milde, & Brumovsky, 2019).

En la Figura 2 se pueden observar los dos tipos de curvas obtenidas a partir de los datos obtenidos en la evaluación de la cinética de secado. La Figura 2a representa el contenido de humedad frente al tiempo; entre los puntos A-B se encuentra el período inicial de secado; mientras que entre los puntos B-C se observa el período constante de secado, representado por una línea recta. Al final de este periodo se encuentra el punto crítico que marca el inicio del período de descenso de la velocidad de secado, mismo que continúa hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Mientras que la Figura 2b muestra la velocidad de secado frente a la humedad libre del alimento. Entre los puntos A-B se produce el proceso de calentamiento y es conocida como la etapa de adaptación, mientras que entre los puntos B-C se produce el período de velocidad constante. Posteriormente entre los puntos C-D se produce el período de velocidad decreciente y al final de esta etapa se observan los puntos D-E fase en la que en la mayoría de los casos se suele observar cambios sensoriales significativos.



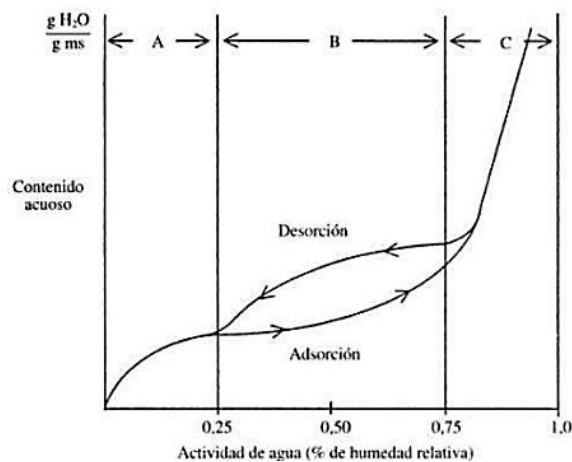
**Figura 2:** Curvas de secado

a: Curva de cinética de secado en relación con el tiempo; b: Curva de velocidad de secado en relación a la humedad libre

**Fuente:** Noroña Gamboa (2018)

### 1.1.2.9. Isotermas de adsorción

Las isotermas se obtienen a partir de la relación entre la humedad y la actividad de agua. La muestra se expone a una humedad relativa controlada, con el fin de que ceda o absorba humedad del ambiente; una vez que la muestra llega a su estado de equilibrio, mantiene su peso constante. En la Figura 3 se observa una curva de una isoterma de adsorción típica. La región A presenta baja actividad de agua y corresponde al agua ligada (perteneciente a la estructura del alimento y monocapa); en la región B el agua se encuentra débilmente unida al alimento a una actividad de agua intermedia. Y la región C se establece a una actividad de agua elevada y se relaciona con el agua libre, la que es más fácil de remover (Anria, González, & Quintero, 2019).



**Figura 3:** Curvas de secado

**Fuente:** Badui Dergal (2016)

El modelado matemático de las isotermas de sorción determina el comportamiento higroscópico de un alimento bajo cierta humedad relativa, así como también facilita la toma de decisiones sobre el tipo de embalaje y almacenamiento que debe tener el producto, en base al estado del alimento. Los modelos más empleados son los de BET y GAB (Caiza Mañay, 2021).

## **1.2.Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Modelar la cinética de secado e isoterma de adsorción de agua de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.).

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Construir la curva de cinética de secado de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.).
- Correlacionar los datos de la curva de cinética de secado con modelos matemáticos referenciales.
- Construir la isoterma de adsorción de agua de la harina obtenida posterior al proceso de secado, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos.
- Correlacionar los datos de la isoterma de adsorción con modelos matemáticos referenciales.



## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Materia prima

La materia prima se obtuvo en un mercado local de la ciudad de Ambato. Una vez en el laboratorio se realizó un control de calidad visual y se seleccionaron aquellas matrices con mejores características. Posteriormente los tubérculos se lavaron con corriente de agua fría y se secaron al sol por 5 días contados desde la cosecha.

#### 2.2. Secado

Las matrices se pelaron y cortaron en rodajas de aproximadamente 2 mm, las rodajas se sometieron a un pretratamiento con microondas (750 W/20 s) y se sumergieron en agua a 4°C por 20 segundos. El pre-tratamiento se realizó para evitar el pardeamiento enzimático y fue definido en base a estudios previos y a pruebas preliminares (Adedeji, Gachovska, Ngadi, & Raghavan, 2008; Salazar et al., 2021; Wang et al., 2017).

Posteriormente las rodajas se secaron por convección en un deshidratador marca Gander mtn (CD 160) a 65°C durante 8 h. Para la construcción de la curva de secado se midió el peso de las muestras cada 10 minutos durante las 2 primeras horas y posteriormente cada 30 minutos.

#### 2.3. Humedad

El contenido de humedad se determinó empleando una Balanza de humedad marca Ken (modelo MLS 50-3).

#### 2.4. Modelado matemático de la cinética de secado

Previo al modelado matemático se determinó la razón de humedad MR (Ecuación 1).

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad \text{Ec. 1}$$

$X$  = Humedad en base seca a cada tiempo (Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>b.s.</sub>)

$X_o$  = Humedad inicial (Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>b.s.</sub>)

$X_e$  = Humedad en equilibrio (Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>b.s.</sub>)

Para determinar la cinética de secado se acoplaron los datos obtenidos a los modelos reportados en la Tabla 2, referentes al modelo de Newton (Ecuación 2), Page (Ecuación 3), Page modificado (Ecuación 4), Henderson y Pabis (Ecuación 5), Logarítmico (Ecuación 6), Thomson (Ecuación 7) y Fick (Ecuación 8) (Montes Montes et al., 2008; Ocampo, 2006).

**Tabla 2.** Ecuaciones utilizadas en el modelado de la cinética de secado

<b>Modelo</b>	<b>Ecuación</b>	
Newton	$MR = Exp(-kt)$	Ec. 2
Page	$MR = Exp(-kt^n)$	Ec. 3
Page modificado	$MR = Exp(-kt)^n$	Ec. 4
Henderson y Pabis	$MR = a \times Exp(-kt)$	Ec.5
Logarítmico	$MR = a \times Exp(-kt) + c$	Ec. 6
Thomson	$MR = 1 + at + bt^2$	Ec. 7
Fick	$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 \times L^2} \times t\right)$	Ec. 8

## 2.5. Isotermas de adsorción de agua

Se empleó el método gravimétrico estático propuesto por W. Spiess y Wolf (1983) y Wolf, Spiess, y Jung (1985), citado por Agama Naranjo (2018). Se pesaron las cápsulas vacías y con las muestras respectivas. Posteriormente se colocaron en depósitos herméticos con humedad relativa controlada (entre 11 y 80% mediante el uso de sales sobresaturadas – Tabla 3). Las cámaras se mantuvieron a  $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ . Los valores de actividad de agua reportados en la Tabla 3 se determinaron utilizando el medidor de actividad de agua AquaLab (modelo 4TE). Las soluciones salinas utilizadas fueron de grado reactivo y el método de preparación fue el adoptado por W Spiess y Wolf (1987).

Las sales actuaron como factores higroscópicos, cediendo o retirando humedad al ambiente hasta alcanzar el estado de equilibrio másico (Acurio, Casa, Igual, Martínez-Navarrete, & Camacho, 2014; González Hurtado, Porras Barrientos, Agudelo Florez, Quintero Cardona, & Diosa Quintero, 2014). Las muestras se pesaron por 2 meses, primero cada 15 días y después cada 30 días, en una balanza analítica de precisión (0,0001 g) marca Oahus (modelo Advecture-Pro), hasta llegar a peso constante ( $\Delta P = \pm 0,0005 \text{ g}$ ), condición que corresponde al equilibrio de la muestra (Prieto, Prieto, Román, Otazo, & Méndez, 2012; W. Spiess & Wolf, 1983).

**Tabla 3.** Sales utilizadas como factor higroscópico

Nomenclatura	Sal	( $a_w$ )
LiCl	Cloruro de Litio	0,1178
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K	Acetato de potasio	0,2982
MgCl <sub>2</sub>	Cloruro de magnesio	0,3425
NaBr	Bromuro de sodio	0,5732
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de amonio	0,8012

**Fuente.** Labuza, Kaanane, y Chen (1985), citado por Aguilera y Alvarado (2001)

## 2.6. Cálculo de la humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio  $w_e$  se determinó mediante la Ecuación 9.

$$w_{e(b.s)} = \frac{P_0 \times w_0 + \Delta P}{P_0 \times (1 - w_0)} \quad \text{Ec. 9}$$

**Donde:**

$w_e$  = humedad en equilibrio ( $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{materia seca}}$ )

$P_0$  = peso inicial de la muestra

$w_0$  = humedad inicial de la muestra

$\Delta P$  = la variación de peso (equilibrio y peso inicial).

## 2.7. Modelado de las isotermas de adsorción

Los datos experimentales se ajustaron a dos modelos empleados para caracterizar el fenómeno de adsorción de agua en alimentos (Tabla 4) (Chirife & Iglesias, 1978).

**Tabla 4.** Ecuaciones utilizadas para el modelado de las isotermas de adsorción

Modelo	Ecuación	Ec.
Brunauer, Emmett y Teller (BET)	$w_e = \frac{w_0 \times C \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 + (C - 1) \times a_w)}$ <p>Donde: <math>w_e</math>=humedad de equilibrio (g<sub>agua</sub>/g<sub>sólidos secos</sub>), <math>w_0</math>=humedad en la monocapa (g<sub>agua</sub>/g<sub>sólidos secos</sub>), <math>C</math>=constante relacionada con el calor de sorción</p>	Ec. 10
Van den Berg & Bruin (GAB)	$w_e = \frac{w_0 \times C \times K \times a_w}{(1 - (K \times a_w)) \times (1 + (C - 1) \times (K \times a_w))}$ <p>Donde: <math>w_e</math>=humedad de equilibrio (g<sub>agua</sub>/g<sub>sólidos secos</sub>), <math>w_0</math>=humedad en la monocapa (g<sub>agua</sub>/g<sub>sólidos secos</sub>), <math>C</math>=constante relacionada con el calor de sorción en la monocapa, <math>K</math>= constante relacionada con el calor de sorción en las multicapas</p>	Ec. 11

La calidad de ajuste de los modelos se evaluó por medio del coeficiente de determinación ( $r^2$ ), que debe ser superior a 0,85 para lograr un buen modelado de datos experimentales (Soler Cárdenas, 2008), por el error medio estimado (Ecuación 12) y el porcentaje de desvío medio relativo (Ecuación 13) (Montes Montes et al., 2008).

$$SE = \sqrt{\left(\frac{\sum(V_{exp} - V_p)^2}{GRL}\right)} \quad \text{Ec. 12}$$

**Donde**

**SE**= Error medio estimado

**V<sub>exp</sub>**= Humedad experimental

**V<sub>p</sub>**= Humedad predicho (calculado a partir de cada modelo)

**GRL**= Número de observaciones

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|V_{exp} - V_p|}{V_{exp}} \quad \text{Ec. 13}$$

**Donde**

**P**= Porcentaje de desvío medio relativo

**V<sub>exp</sub>**= Humedad experimental

**V<sub>p</sub>**= Humedad predicho (calculado a partir de cada modelo)

**n**= Número de observaciones

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Humedad y actividad de agua de la oca blanca y zanahoria blanca

La Tabla 5 muestra el contenido de humedad y actividad de agua de las matrices frescas antes y después del proceso de secado. Se puede evidenciar que la zanahoria blanca presentó un mayor contenido de humedad. La Oca presenta menor humedad debido a que fue sometida al sol durante 5 días para disminuir su amargor característico, debido a la presencia de ácido oxálico (Gualoto Lata, 2021).

El contenido de humedad y actividad de agua en un alimento es un factor determinante, ya que no solo influye en la textura, sino también en las reacciones químicas, físicas, microbiológicas y enzimáticas (Villacrés, Quelal, & Álvarez, 2016).

**Tabla 5.** Humedad y actividad de agua de la oca blanca y zanahoria blanca, antes y después del proceso

Estado	Propiedad	Oca blanca	Zanahoria blanca
Fresco	Humedad %	70,599	76,786
	Actividad de agua	0,9836	0,9874
Seco	Humedad %	6,439	7,210
	Actividad de agua	0,3624	0,3698

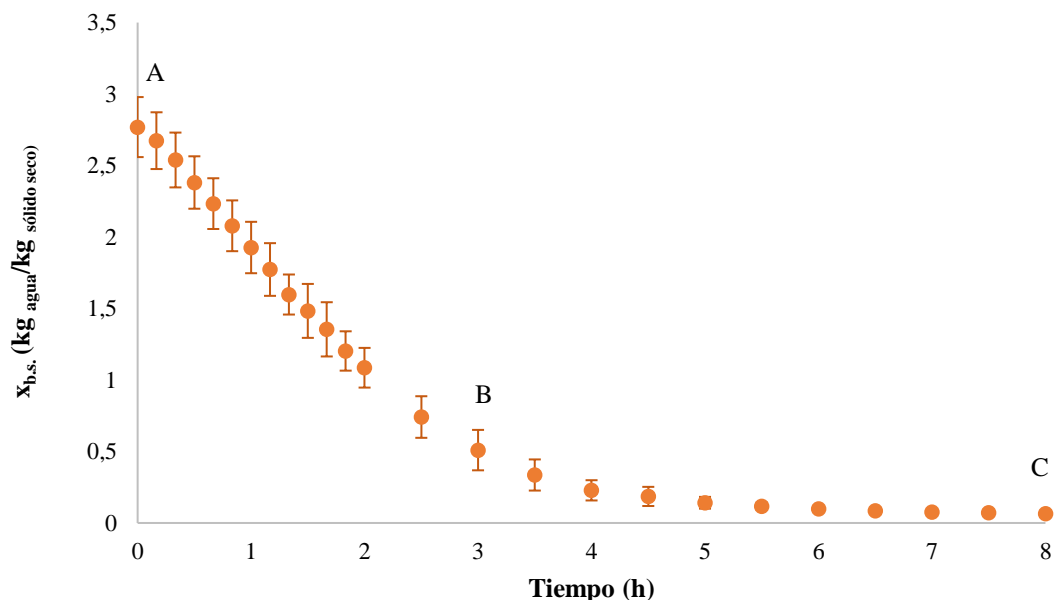
#### 3.2. Curvas de cinética de secado

Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas de cinética de secado de Oca blanca y Zanahoria blanca. Se observa claramente la disminución de la humedad frente al tiempo (Ibarz & Barbosa, 2005).

### 3.2.1. Oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

La Figura 4 representa la pérdida de humedad frente al tiempo de la Oca blanca. Se observa que en la etapa A-B la tendencia de la curva presenta un comportamiento decreciente y la remoción de humedad ocurre a una velocidad alta. Por medio del cálculo de la pendiente de esta zona, se determinó una tasa de pérdida de humedad de  $0,0134 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}\times\text{h}$ , la cual permanece constante hasta el final de esta etapa. Según Larrosa, Lorenzo, Zaritzky, y Califano (2016), en esta fase se produce una pérdida de humedad muy rápida debido a la alta variación de humedad del aire y la muestra.

Posteriormente se evidencia una inflexión en el punto B, que representa una disminución muy rápida de la velocidad. A partir de este punto se forma la zona B-C, que muestra un cambio claro de tendencia, que está relacionado con la pérdida de humedad del agua más ligada del alimento. En esta zona se evidencia una tasa de pérdida de humedad de  $0,0016 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}\times\text{h}$ ; al comparar este valor con la tasa anterior se evidencia que en esta etapa a la muestra le cuesta liberar agua debido a que la mayor parte ya fue evaporada. Resultados similares se observaron en el secado de Oca (*Oxalis tuberosa*) (Guamán Lozada, Carrera Oña, & Martínez Chavez, 2021).



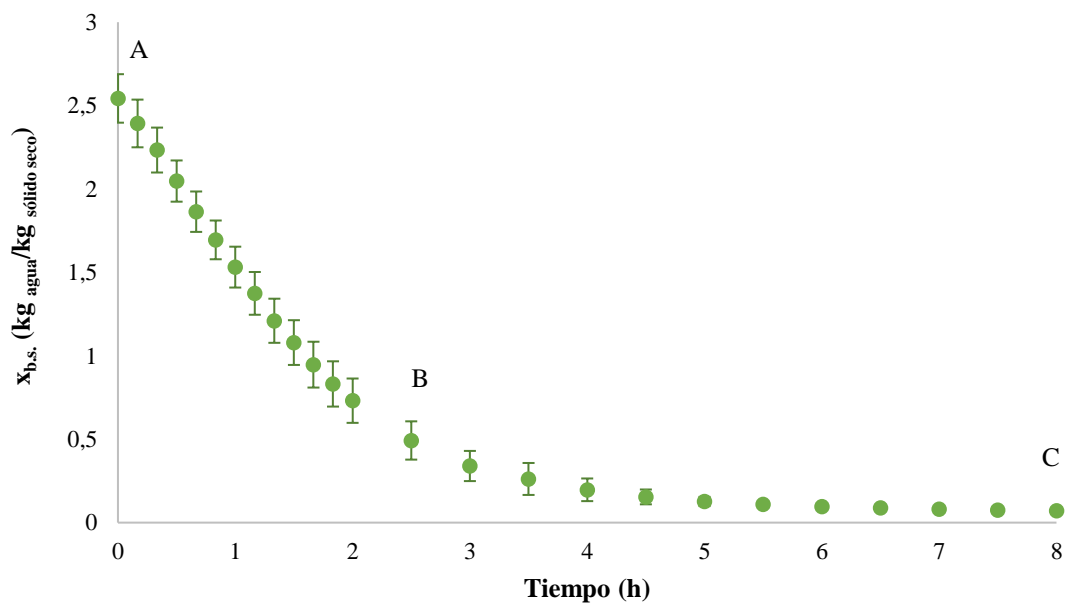
**Figura 4.** Curva experimental de secado de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca).

### 3.2.2. Zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

La Figura 5 representa la pérdida de humedad frente al tiempo de Zanahoria blanca. En la etapa A-B la tendencia de la curva presenta un comportamiento decreciente con una remoción de humedad de  $0,0143 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}\times\text{h}$ , la cual permanece constante hasta el final de esta etapa.

Posteriormente se evidencia un punto de inflexión (B), que representa el inicio de la remoción de secado más lenta. En esta etapa la tendencia toma una dirección horizontal y tiene una tasa de pérdida de humedad de  $0,0014 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}\times\text{h}$ . Resultados similares se observaron en la curva de secado Oca amarilla (*Oxalis tuberosa*) (Acebey Colque, 2018). Por otra parte, la diferencia de humedad inicial para las dos matrices se debe al origen del alimento, tipo, madurez, ubicación, clima, manipulación y almacenamiento después de la cosecha (Castro, Rodríguez, & Vargas, 2008).

De acuerdo con las desviaciones estándar se observa una mínima dispersión de los datos, demostrando que se llevó a cabo un adecuado proceso de secado y una correcta toma de resultados durante todo el proceso.



**Figura 5.** Curva experimental de secado de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

### 3.3. Curvas de velocidad de secado

La velocidad de secado presenta tres etapas importantes: el período de adaptación (García Mogollón, Torregroza Espinosa, & Sierra-Bautista), el período de secado a velocidad constante (B-C), el primer período de secado a velocidad decreciente (C-D) y el segundo periodo de secado a velocidad decreciente (D-E) (García Díaz et al., 2018; Torregroza-Espinosa, Montes-Montes, Ávila-Gómez, & Remolina-López, 2014).

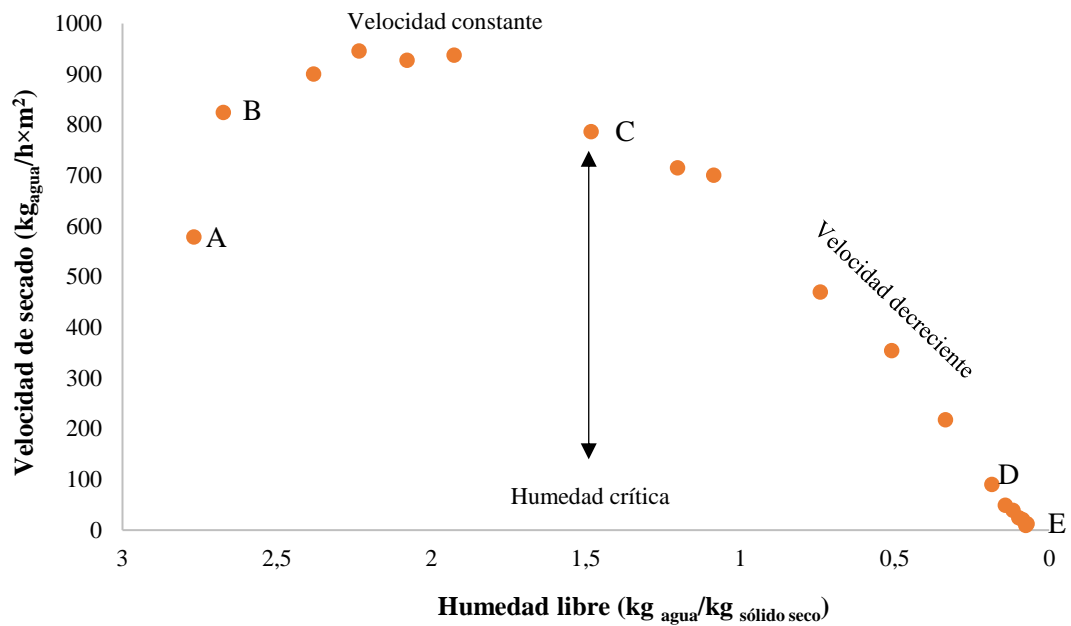
#### 3.3.1. Oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

La Figura 6 representa la curva de velocidad de secado de la Oca blanca. En el período de adaptación la humedad del alimento se redujo  $0,23 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  y tardó alrededor de 20 minutos. Es esta fase se produjo el aumento de la temperatura de la interfaz a las condiciones de procesamiento.

Posteriormente se observó el período de secado a velocidad constante (B-C), que presentó una tendencia lineal aproximada, una pérdida de humedad de  $1,2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  y tuvo una duración de 80 minutos. En esta fase la muestra perdió humedad a una velocidad de  $934,1 \pm 22,4 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h} \times \text{m}^2$  hasta llegar a la humedad crítica ( $1,4 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ ). De acuerdo con bibliografía esta fase depende directamente del tipo de producto, temperatura, humedad relativa del aire, dirección del flujo y espesor de la matriz (Restrepo Victoria & Burbano Jaramillo, 2005).

La tercera etapa (C-D) evidenció una caída paulatina de la velocidad de secado (de  $934$  a  $86 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h} \times \text{m}^2$ ). Esta tendencia se debe a que la capa superficial de agua del alimento se ha evaporado por completo. En este caso el alimento perdió  $1,3 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  y tuvo una duración de 180 minutos. Finalmente se observa el período D-E, en el que la velocidad de secado decae completamente, llegando a alcanzar valores cercanos a cero ( $9,2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h} \times \text{m}^2$ ). En esta etapa la matriz de alimento alcanzó la humedad de equilibrio (punto E) a un valor de  $0,07 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  (Guamán Lozada et al., 2021).



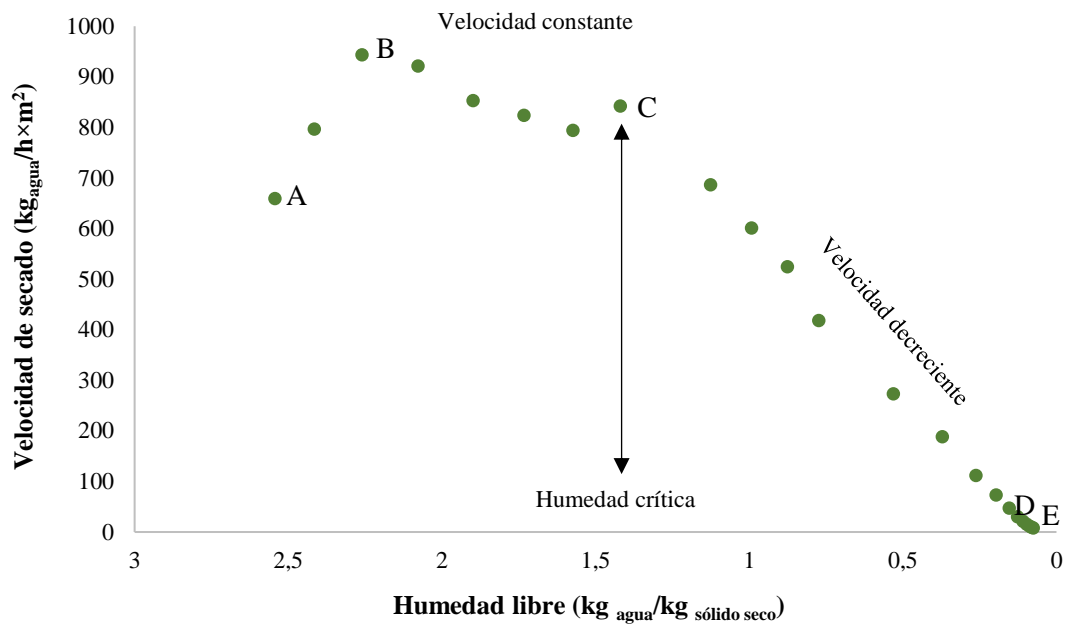


**Figura 6.** Curva de velocidad de secado de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

### 3.3.2. Zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

La Figura 7 representa la curva de velocidad de secado de Zanahoria blanca. En el período inicial la reducción de humedad fue de 0,23 kg agua/kg sólido seco y se llevó a cabo en 20 minutos. En el período de velocidad constante (B-C) se observó una tendencia lineal decreciente y se produjo una disminución de humedad de 1,12 kg agua/kg sólido seco en un tiempo de 70 min. El punto C presentó una humedad 1,4 kg agua/kg sólido seco que corresponde a la humedad crítica. La velocidad en el periodo constante fue de  $867,02 \pm 63,47$  kg agua/h x m<sup>2</sup>. Bibliográficamente la caída de tendencia en la etapa de velocidad constante se debe a que el gas cambia de estado estacionario a no estacionario, por causa de factores externos como la presión y temperatura (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019).

En la tercera etapa (C-D) se evidenció una caída de velocidad de secado (de 867 a 73 kg agua/h x m<sup>2</sup>). El agua del alimento se evaporó por completo y perdió 1,22 kg agua/kg sólido seco durante 170 minutos. Finalmente se observó el período D-E, en el que la velocidad de secado decae completamente, llegando a alcanzar valores cercanos a cero (7,6 kg agua/h x m<sup>2</sup>). En esta etapa la matriz de alimento alcanzó la humedad de equilibrio (punto E) a un valor de 0,065 kg agua/kg sólido seco.



**Figura 7.** Curvas de velocidad de secado de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

### 3.4. Modelos matemáticos de curvas de secado

La aplicación de las ecuaciones matemáticas se realizó mediante la relación de la razón de humedad (MR) frente al tiempo (horas). Se obtuvieron las constantes  $n$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  para cada modelo, mismas que arrojan diferentes valores y dependen del tipo de alimento. Además, se determinó el valor de la constante  $k$ , que representa la tasa de pérdida de humedad. En el modelo de Fick se obtuvo la difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ), que determina la difusión de moléculas de agua en el alimento (Espierrez Crespo, 2012).

#### 3.4.1. Correlación de los datos de las curvas de cinética de secado de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

En la Figura 8 se observan todas las curvas de secado obtenidas durante el modelado matemático de Oca blanca. Se emplearon los siete modelos matemáticos detallados en la Tabla 2 y se obtuvieron los parámetros de los modelos matemáticos, los coeficientes de determinación, el error medio estimado y el porcentaje de desvío medio relativo (Tabla 6), de acuerdo con lo detallado previamente en la metodología.

Analizando los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se determinó que el modelo que presentó mejor ajuste fue el de Page, ya que presentó un valor de 0,9986,

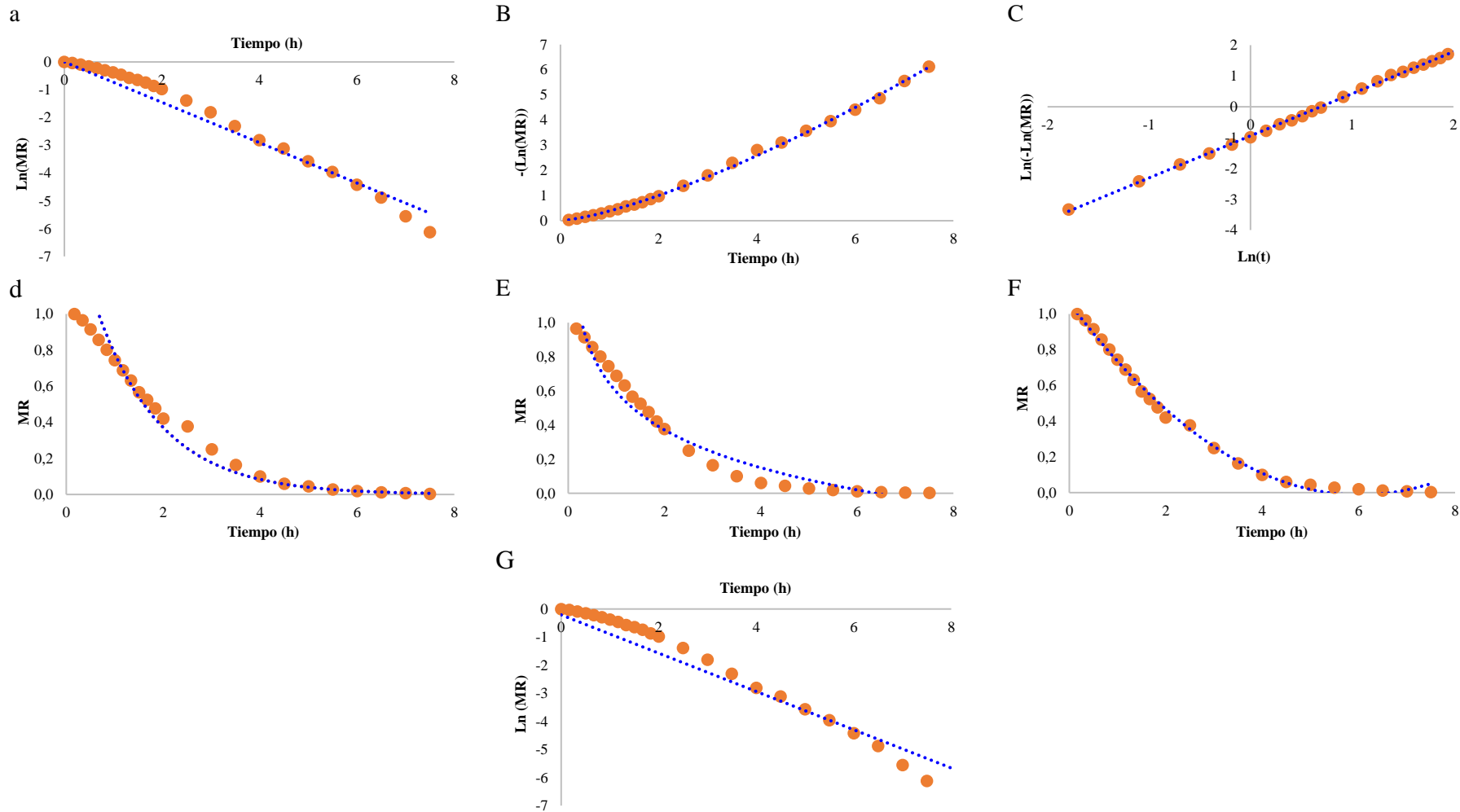
alto en comparación a los otros modelos empleados. Resultados similares se observaron en el secado de papas con un coeficiente de determinación de 0,9013 (Della Rocca & Mascheroni, 2011).

De forma contraria, el modelo que presentó un valor menor en este coeficiente fue el de Henderson y Pabis, con un  $R^2$  de 0,9497; resultados similares se observaron en una variedad de arveja (*Pisum sativum* L.) (Pantoja, Osorio, Mejía, & Váquiro, 2016). Sin embargo, se puede considerar que todos los modelos presentaron un buen ajuste con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mayor al 90%. Al analizar el error medio estimado (SE) y el desvío medio relativo (P), el modelo de Page nuevamente destacó por presentar valores bajos (0,023 y 0,013 respectivamente). Mientras que el modelo de Henderson y Pabis presentó valores de 8,1 y 19,3 respectivamente.

El parámetro  $k$  representa al movimiento de humedad en el interior del alimento y la transferencia hacia la superficie del aire; además tiene una relación directa con la temperatura, por ende, valores mayores representan un proceso de secado más rápido (Ananias, Vallejos, & Salinas, 2005; Sánchez Salmerón, 2018).

El parámetro  $a$  es independiente, ya que pertenece a la constante del modelo que caracteriza al alimento. También se denomina *constante de regresión* y es equivalente al valor de  $y$  cuando  $x$  tiende a cero. El parámetro  $b$  depende del contenido de sólidos y de la temperatura empleada; esta es la pendiente de la recta que indica el incremento o decremento de la variable  $y$ . Mientras que el parámetro  $c$  depende del contenido de sólidos y el parámetro  $n$  depende de la temperatura (Mondragón Cazorla, 2013; Palacios Cruz, Pérez, Rivas Ruiz, & Talavera, 2013).

Al aplicar el modelo de Fick se determinó que la Oca blanca presentó una difusividad efectiva de  $2,76^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, este valor en matrices alimentarias oscila en un rango de  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s (García Mogollón et al., 2016). Resultados similares se observaron en plátano verde (*Musa paradisiaca*) (Torres Lara, 2012). La variación de la difusividad depende principalmente de las condiciones de secado (temperatura, presión y velocidad) y de la matriz (estructura, tamaño y composición) (Carhuancho Ayuque & Palomino Chauca, 2021; Salcedo Mendoza, Contreras Lozano, García López, & Fernandez Quintero, 2016).



**Figura 8.** Curvas de secado del modelado matemático de oca blanca

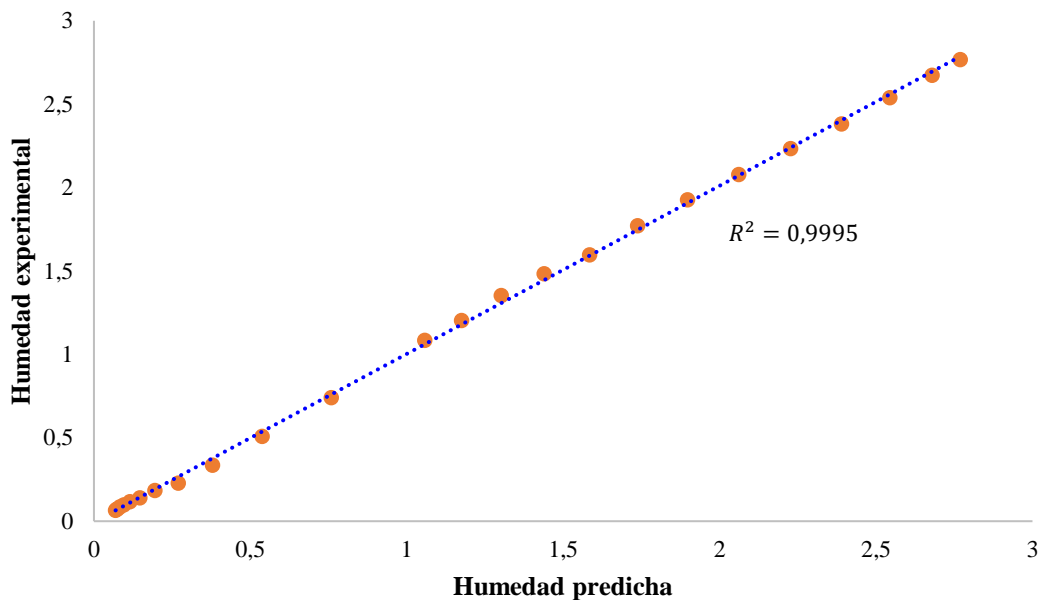
a. Newton; b. Page; c. Page modificado; d. Henderson y Pabis; e. Logarítmico; f. Thomson; g. Fick

**Tabla 6.** Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de oca blanca

Modelos	Parámetros						$R^2$	SE	P
	k	a	b	c	N	$D_{eff}$			
Newton	0,7261						0,9845	1,2457	0,9342
Page	0,3893				1,3656		0,9986	0,023	0,013
Page modificado	0,2037				1,3656		0,9993	4,755	7,5582
Henderson y Pabis	0,745	1,6428					0,9497	8,1217	19,32
Logarítmico	0,4682	1,14		0,0645			0,952	1,3943	4,1101
Thomson		0,3569	0,0296				0,9955	0,16	3,95
Fick						$2,762^{-7}$	0,9887	2,6244	8,8533

La Figura 9 representa la comparación de la humedad experimental frente a la humedad predicha con el modelo (Page) para Oca blanca. Se observa claramente una tendencia completamente lineal, con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,9995.

La bondad de ajuste de los datos empíricos obtenidos por el mejor modelo es de gran ayuda, ya que brinda información de las condiciones de secado (Camaño, Rivera, & Zapata, 2020). Resultados similares se observaron en el secado de hojas de quinua, estudio en el que el modelo de Page mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9995 (Coloma Paxi, Paquita Ninaraqui, Velásquez Huallpa, & Abarca, 2017).



**Figura 9.** Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page

### 3.4.2. Correlación de los datos de las curvas de cinética de secado de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

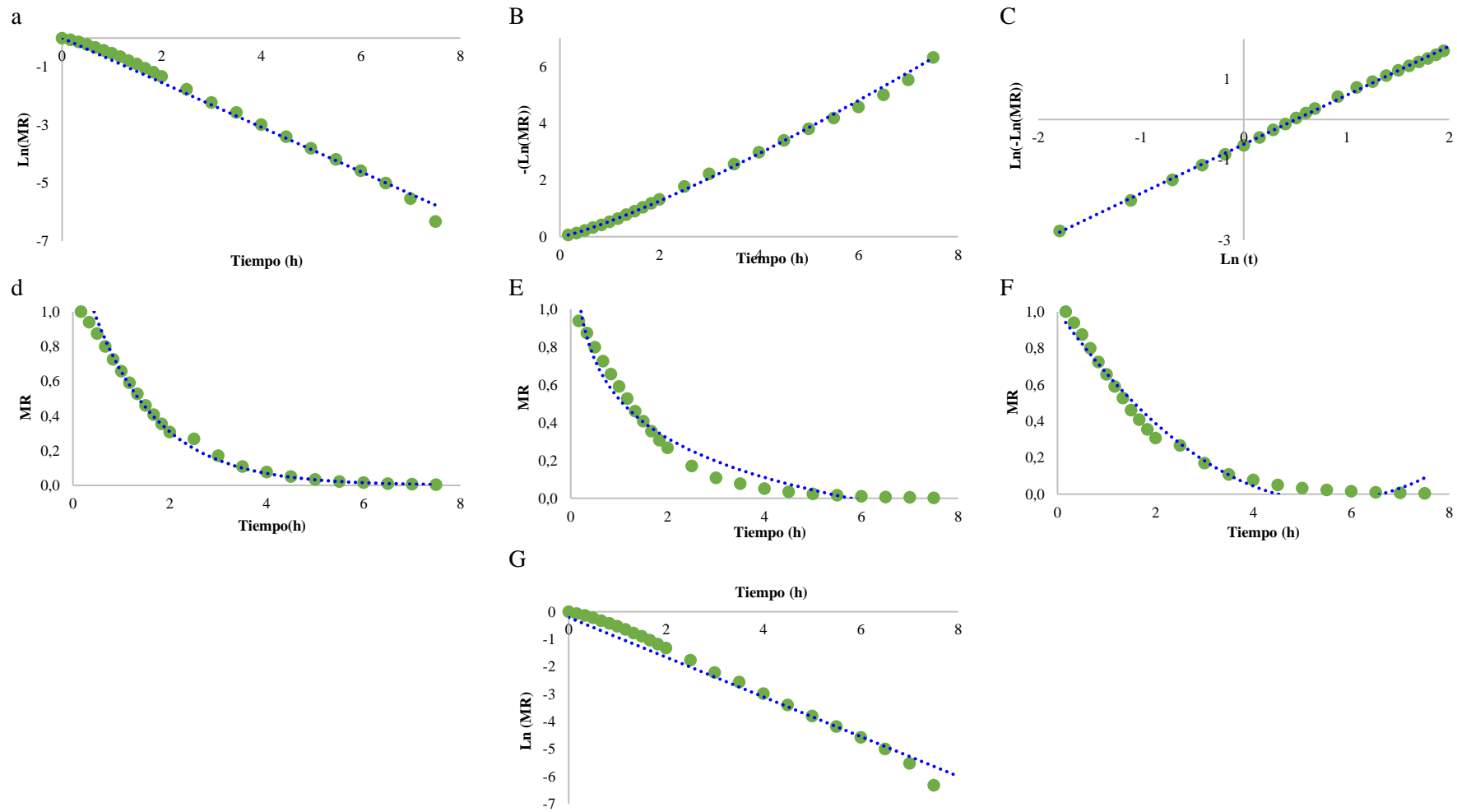
En la Figura 10 se observan las curvas de secado obtenidas durante el modelado matemático de Zanahoria blanca. Se emplearon los siete modelos matemáticos detallados en la Tabla 2 y se obtuvieron los parámetros de los modelos matemáticos, los coeficientes de determinación, el error medio estimado y el porcentaje de desvío medio relativo (Tabla 7).

Analizando los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se determinó que el modelo que presentó mejor ajuste fue el de Page, ya que presentó un valor de 0,9977, alto en comparación a los otros modelos empleados.

En una investigación realizada por Torregroza-Espinosa et al. (2014), para el secado de tres variedades de yuca, se obtuvo resultados similares con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0,993; 0,992 y 0,984. Por otro lado, el modelo que presentó un valor menor en este coeficiente fue el de Henderson y Pabis, con un  $R^2$  de 0,9864. Similar a lo observado en Oca blanca, todos los modelos presentaron valores de  $R^2$  superiores al 90%.

Al analizar el error medio estimado (SE) y el desvío medio relativo (P), el modelo de Page nuevamente destacó por presentar valores bajos (0,039 y 0,12 respectivamente). Mientras que el modelo de Henderson y Pabis presentó valores de 6,46 y 18,84 respectivamente.

Con el modelo de Fick se determinó una difusividad efectiva de  $2,9196^{-7} \text{m/s}^2$ . Un estudio realizado en zanahoria blanca por Candelario, Luna, Urrea, y Ramírez (2017), determinó una difusividad efectiva de  $1,23746^{-11} \text{m/s}^2$ ; sin embargo, en los dos casos los valores se encuentran dentro del rango mencionado en bibliografía para matrices alimentarias.



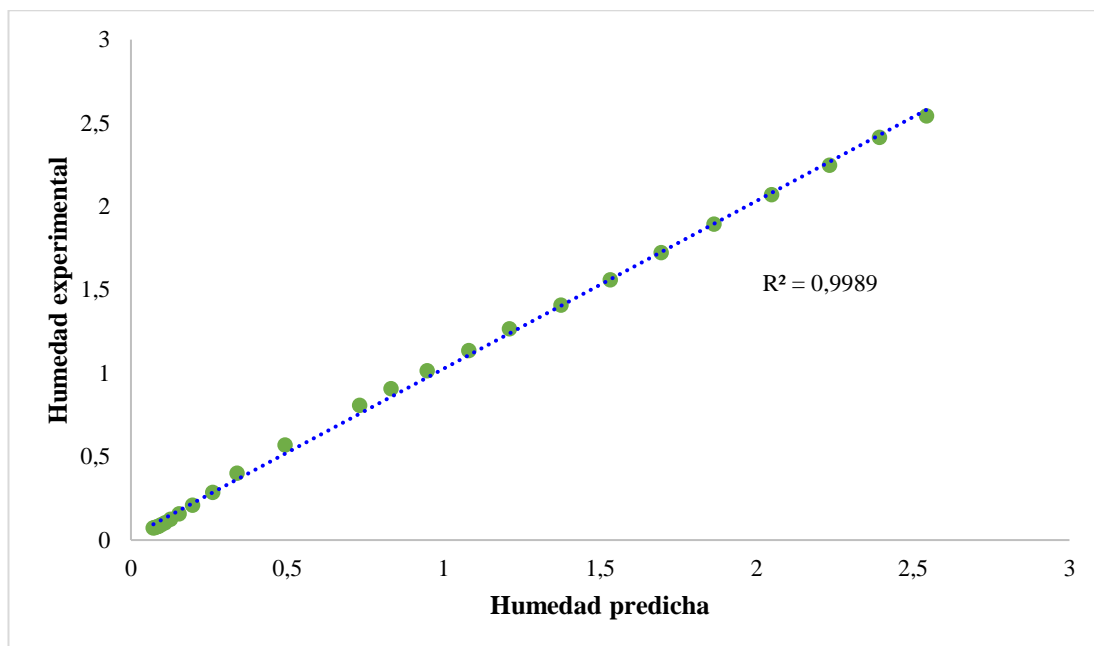
**Figura 10.** Curvas de secado del modelado matemático de zanahoria blanca  
a. Newton; b. Page; c. Page modificado; d. Henderson y Pabis; e. Logarítmico; f. Thomson; g. Fick



**Tabla 7.** Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de zanahoria blanca

Modelos	Parámetros						$R^2$	SE	P
	k	a	B	c	n	$D_{eff}$			
Newton	0,7684						0,9951	0,1708	0,5206
Page	0,5399				1,2194		0,9977	0,039	0,1210
Page modificado	0,6164				1,2194		0,9990	4,4474	9,8944
Henderson y Pabis	0,751	1,3872					0,9864	6,4694	18,8409
Logarítmico	0,6151	1,08		0,0262			0,9636	1,1864	4,1582
Thomson		0,3746	0,0337				0,9788	0,2043	3,9198
Fick						$2,9196^{-7}$	0,9959	2,6320	10,4904

La Figura 11 representa la comparación entre la humedad experimental y la humedad predicha obtenida con el modelo de Page para Zanahoria blanca. Se puede considerar que presenta un buen ajuste ya que se observa una tendencia lineal con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9989. Según Camaño et al. (2020), la variación de bondad de ajuste depende del tipo de producto, condiciones del mismo (tamaño) y del proceso (temperatura, pretratamiento y humedad de aire).



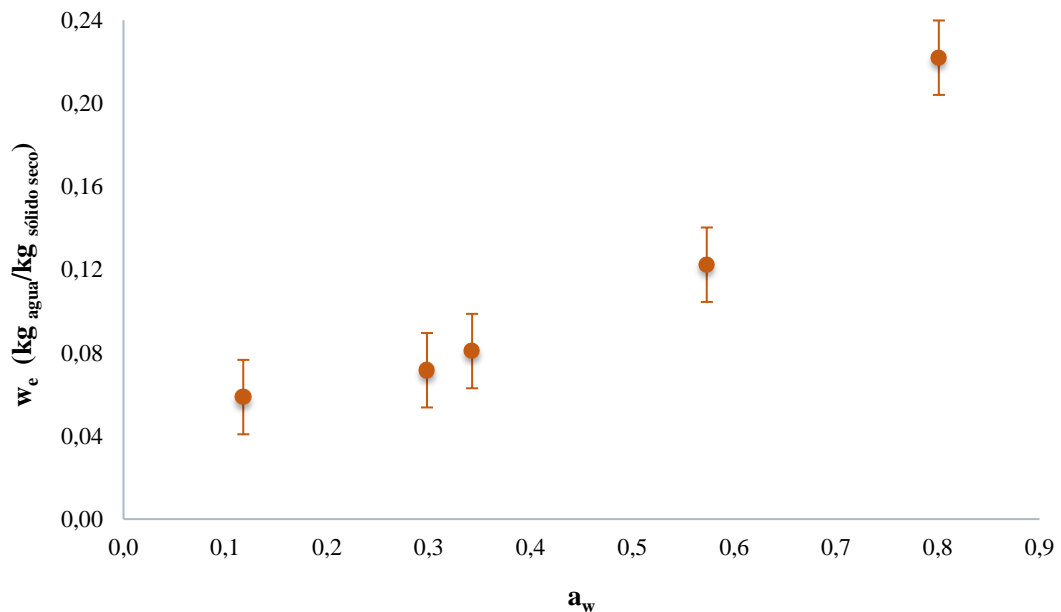
**Figura 11.** Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page

### 3.5. Isoterma de adsorción de harina de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

El comportamiento de la isoterma de adsorción de la harina de Oca blanca se observa en la Figura 12. De acuerdo con la forma de la curva se puede evidenciar que es una isoterma tipo II, denominada también sigmoidal ya que presenta una pequeña pendiente en el punto donde se encuentra la actividad de agua más baja.

Además, en el centro de la curva se encuentra un punto de inflexión y en la parte superior una tendencia creciente de forma exponencial (Delgado Delgado, 2021). Resultados similares se reportaron en harina de yuca (Navia, Ayala, & Villada, 2011).

La curva de isoterma mostró que la matriz es altamente higroscópica, ya que mientras mayor fue la humedad relativa del ambiente, presentó mayor capacidad de adsorción de moléculas de agua del ambiente. Los cambios estructurales de la matriz alimentaria influyen en el proceso de adsorción; por ejemplo, el proceso de secado provoca un incremento de puntos activos de adsorción de agua, lo que favorece a un incremento en la higroscopicidad de la matriz debido al contenido de almidón presente. Así mismo, el incremento de actividad de agua permite la solubilización de fracciones amorfas de almidón, lo que contribuye a la formación de sitios activos y a la ganancia de agua (Quintero, Giraldo, Lucas, & Vasco, 2013).

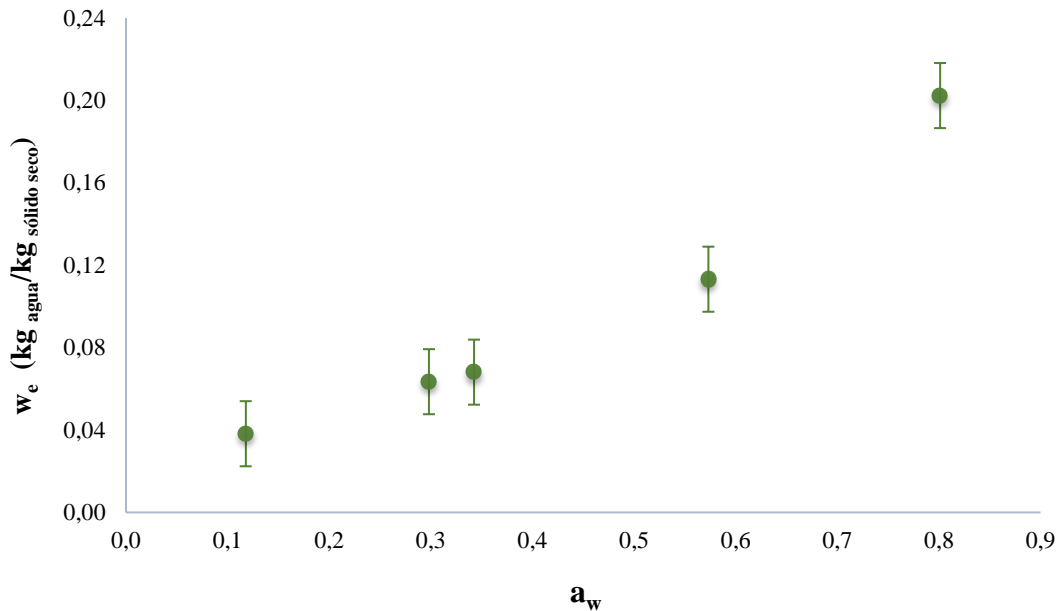


**Figura 12.** Curva experimental de isoterma de adsorción de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca).

### 3.6. Isoterma de adsorción de harina zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

La harina de Zanahoria blanca también presentó una curva característica de una isoterma tipo II (Figura 13). Las isotermas sigmoidales son típicas en alimentos no porosos (Martínez Navarrete, Andrés Grau, Chiralt Boix, & Fito Maupoey, 1999). Y en este caso guarda relación con la estructura de la Oca, que según Rosas Mendoza y Zambrano Zaragoza (2010), presenta una estructura cerrada tridimensional.

Además, este comportamiento es típico en alimentos amiláceos, como papas, maíz, harinas y pastas, ya que evidencian una mayor capacidad para retener agua; mientras que en alimentos que contienen alto contenido de azúcares, se suele observar ausencia del punto de inflexión y una curva convexa al eje de las abscisas.



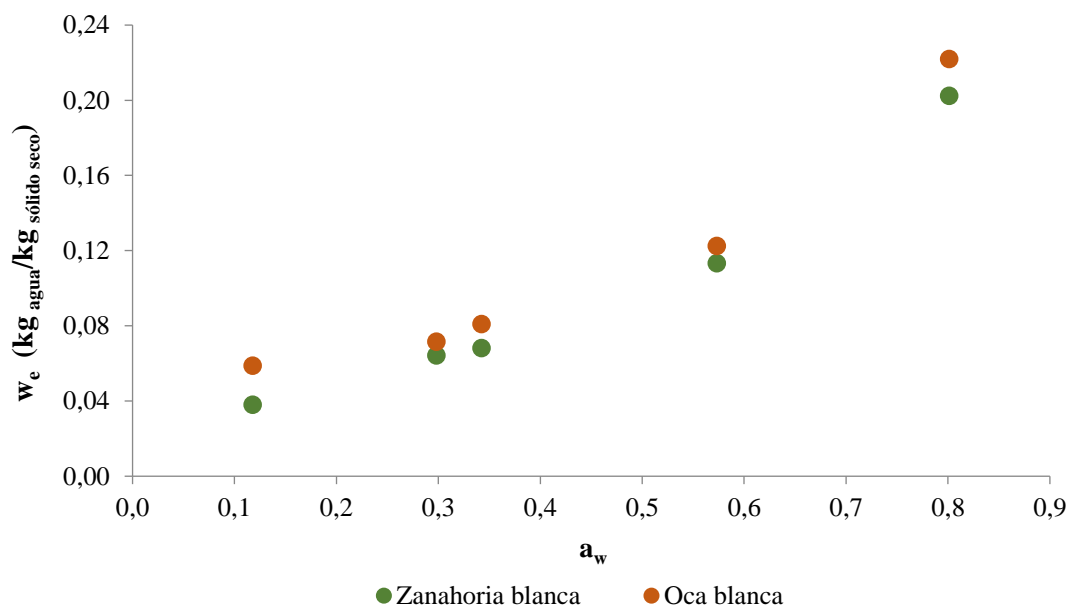
**Figura 13.** Curva experimental de isoterma de adsorción de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

### 3.7. Comparación de las isotermas de adsorción de harina de oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

La Figura 14 permite realizar una comparación entre las dos muestras estudiadas. La posición de las curvas demuestra que la harina de Oca blanca tiene mayor humedad en equilibrio frente a la harina de zanahoria blanca; sin embargo, ambas mostraron un similar proceso de adsorción.

Inicialmente se observa que las muestras absorben una cantidad mínima de agua del ambiente; mientras que a partir de una humedad relativa del 30% se evidencia un incremento considerable. Una vez que se ha conocido el comportamiento del alimento bajo condiciones controladas, se puede seleccionar el material de empaque y determinar la humedad a la que el alimento debe someterse a almacenamiento (Matos Chamorro & Rajo Angulo, 2010).

Debido al comportamiento de las matrices se concluye que se deben almacenar a humedades relativas inferiores al 60% para que las muestras se mantengan dentro del valor de humedad considerado como estable ( $11 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ ) (Vega Gálvez, Lara Aravena, & Lemus Mondaca, 2006). Resultados similares se observaron en harina de maíz, en la que se determinó que la humedad relativa óptima de almacenamiento debe ser inferior a 75% debido a un entrecruzamiento en las isotermas a esta actividad de agua (Ramírez Miranda, Cruz y Victoria, Vizcarra Mendoza, & Anaya Sosa, 2014).



**Figura 14.** Isoterma de adsorción de harina oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

### 3.8. Correlación de los datos de las curvas de isoterma de adsorción de harina de Oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

En el modelo de BET se ajustó correctamente hasta una actividad de agua de 0,57, mientras que en el modelo de GAB se ajustó en todo el rango evaluado, por ello es el más empleado en gran parte de alimentos secos (Talens Oliag, 2017).

Los parámetros obtenidos con cada modelo se pueden evidenciar en la Tabla 8. La humedad de la monocapa ( $w_0$ ) para el modelo de BET fue de  $0,0557 \text{ g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{sólido seco}}$  y  $0,0524 \text{ g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{sólido seco}}$  para el modelo de GAB.

Este parámetro determina la humedad ligada del alimento y esta capa comúnmente se encuentra saturada por moléculas de agua (Gutierrez Balarezo, Díaz Viteri, Mendieta Taboada, Pulla Huilca, & Chañi Paucar, 2019). Valores similares fueron reportados en harina de yuca (0,0562 g agua/g sólido seco) y en granos de kiwicha (0,0551 g agua/g sólido seco) (Alvarado & Cornejo, 2009; Peralta, Choque, & Rivas, 2014).

Por otra parte, la constante C se conoce como calor de sorción y relaciona los sitios activos de la matriz alimentaria y las moléculas de agua de la atmósfera. La forma de la curva está relacionada con el valor de esta constante, cuando su valor es mayor a 2 significa que existe un punto de inflexión en la curva, por lo tanto, la isoterma es de tipo II y el alimento muestra una capacidad de adsorción de agua en multicapas. Mientras que valores menores a 2 demuestra que no existe un proceso de adsorción (Martínez Navarrete et al., 1999; Moreira Chachipanta, 2018).

El factor de corrección de la constante de sorción de la multicapa (K) del modelo de GAB arrojó un valor de 0,9401. Bibliográficamente se considera que debe ser inferior a 1 y que representa la interacción de moléculas de agua de la multicapa con relación al absorbente (Ceballos, Giraldo, & Orrego, 2009; García, Schmalko, & Tanzariello, 2007). Resultados similares se observaron en harina de zanahoria con una constante de sorción de 0,944 (Anria et al., 2019).

Los dos modelos matemáticos empleados presentaron un coeficiente de correlación superior al 90%; sin embargo, el modelo que se ajustó con mayor eficiencia fue el modelo de GAB con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,9872. Resultados similares se observaron en harina de castaña (*Bertholletia excelsa h.b.k*) (Huamán Yuca, 2016) y en harina de camote (*Ipomoea batata* L.) (Saavedra Layza, 2022).

**Tabla 8.** Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos GAB y BET para oca blanca (*Oxalis tuberosa* variedad Blanca)

	<b>GAB</b>	<b>BET</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9872	0,9833
<b>C</b>	78,9529	258,0737
<b>w<sub>0</sub></b>	0,0557	0,0524
<b>K</b>	0,9401	

### 3.9. Correlación de los datos de las curvas de isoterma de adsorción de harina de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

En la Tabla 9 se observan los parámetros determinados para cada modelo. El contenido de humedad de la monocapa  $w_0$  para el modelo de BET fue de 0,0571 g agua/g sólido seco y 0,0508 g agua/g sólido seco para el modelo de GAB. Valores similares se observaron en harina de maca (*Lepidium meyenii*) a 25°C. El autor menciona que cuando existe un incremento en la temperatura, este contenido de humedad disminuye debido a que el movimiento de moléculas de agua a temperaturas elevadas le confiere menos estabilidad y esto tiene a su vez relación con el rompimiento de enlaces en el sitio activo de la matriz alimentaria (Gavidia Rodríguez, 2015).

La constante del calor de sorción  $C$  para el modelo de GAB arrojó un valor de 11,8471, mientras que para el modelo de BET fue 15,2920. El factor de corrección de la constante de sorción de la multicapa ( $K$ ) arrojó un valor de 0,9098, que también se encuentra dentro del rango establecido siendo inferior a 1. Resultados similares se observaron en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*) a 20°C (Briceño Sevillano, 2017).

**Tabla 9.** Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos GAB y BET para zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancr.)

	<b>GAB</b>	<b>BET</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9881	0,9716
<b>C</b>	11,8471	15,2920
<b>w<sub>0</sub></b>	0,0571	0,0508
<b>K</b>	0,9098	

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- El proceso de secado realizado a 65°C durante 8 horas, evidenció tres etapas claras. En la primera etapa de inducción o período de adaptación, la humedad del alimento se redujo mínimamente y tardó un tiempo corto. En esta fase se produjo el aumento de la temperatura de la interfaz a las condiciones de procesamiento. Posteriormente se observó el período de secado a velocidad constante, que presentó una tendencia lineal aproximada. En este periodo se produjo una reducción de humedad considerable y tuvo una duración más amplia de tiempo. La tercera etapa evidenció una caída paulatina de la velocidad de secado. Esta tendencia se debe a que la capa superficial de agua del alimento se ha evaporado por completo. La humedad crítica arrojó un valor de 1,4 kg agua/kg sólido seco, para ambas matrices. Mientras que la humedad de equilibrio fue de 0,06 kg agua/kg sólido seco y 0,07 kg agua/kg sólido seco, para Oca blanca y Zanahoria blanca, respectivamente.
- Los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente a siete modelos matemáticos, destacándose el modelo de Page, ya que presentó un coeficiente de determinación de 0,9986 y 0,9978 para Oca blanca y Zanahoria blanca, respectivamente. Así mismo los valores de error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo fueron inferiores a 1 en este modelo. Al comparar la curva experimental con la predicha, se determinó el excelente ajuste proporcionado por el modelo de Page, demostrando que la aplicación de modelos matemáticos es muy útil para estudiar y predecir el proceso de secado.
- Las isotermas evidenciaron una forma sigmoideal de tipo II, con la presencia de un punto de inflexión a actividades de agua bajas. La Oca blanca presentó una característica más higroscópica debido a los cambios estructurales que sufrió la matriz durante el secado, lo que provocó un incremento de puntos activos de adsorción de agua. Finalmente, se concluye que ambas matrices se deben secar



hasta alcanzar una humedad por debajo de  $11 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  y deben almacenarse en ambientes con humedad relativa inferior al 60%, con el fin de que estas se mantengan estables por más tiempo.

- Las ecuaciones de GAB y BET se ajustaron correctamente a los datos experimentales, destacando al modelo de GAB con un coeficiente de determinación de 0,9401 para Oca blanca y 0,9098 para Zanahoria blanca. El contenido de humedad que debe mantener el alimento para permanecer estable fue de  $0,0557 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$  y  $0,0571 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ , respectivamente.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Emplear soluciones salinas con actividades de agua que mantengan rangos cercados para conocer de mejor manera el comportamiento y dirección de la curva.
- Realizar el estudio de isotermas de adsorción a diferentes temperaturas para evaluar el efecto de esta propiedad en los parámetros de BET y GAB.
- Evaluar las isotermas de adsorción de las harinas probando diferentes empaques, para elegir aquel que permita mantener el alimento por más tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acebey Colque, G. K. (2018). *Elaboración experimental de harina, de consumo humano, a partir de oca amarilla (Oxalis Tuberosa) cultivada en la localidad de Iscayachi, Departamento de Tarija*. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Bolivia.
- Acurio, L., Casa, F., Igual, M., Martínez-Navarrete, N., & Camacho, M. d. M. (2014). Efecto de la deshidratación en las propiedades ópticas y mecánicas de diferentes variedades de berenjena. Estudio de las condiciones de almacenamiento. *CIBIA*, 191.
- Adedeji, A., Gachovska, T., Ngadi, M., & Raghavan, G. (2008). Effect of pretreatments on drying characteristics of okra. *Drying Technology*, 26(10), 1251-1256.
- Agama Naranjo, A. R. (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, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/27135>
- Aguilera, L. M., & Alvarado, J. d. D. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*. Ecuador
- Alvarado, G., & Cornejo, F. (2009). Obtención de harina de yuca para el desarrollo de productos dulces destinados para la alimentación de celíacos. 4, 107-116.
- Ananias, R. A., Vallejos, S., & Salinas, C. (2005). Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7(1), 37-47.
- Anria, M., González, A., & Quintero, R. (2019). Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias deshidratadas. *Revista I+ D Tecnológico*, 15(1), 17-23.
- Apaza Morocco, B. D. (2018). *Extracción y caracterización del almidón de oca (Oxalis tuberosa) de la variedad k' ellu kamusa*. Universidad Peruana Union, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12840/1640>

- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6), 121-126.
- Badui Dergal, S. (2016). *Química de los alimentos*: México, Pearson Educación.
- Briceño Sevillano, S. M. (2017). *Efecto de la temperatura en el valor de Monocapa de tres tipos de Harina de Tarwi (lupinus mutabilis) variedad criolla mediante la isoterma de gab*. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 60(2), 309-319.
- Caiza Mañay, D. R. (2021). *Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y ecuaciones de ajuste: una revisión bibliográfica de datos publicados*. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Camaño, J. A., Rivera, A. M., & Zapata, J. E. (2020). Efecto del espesor de película y de la ubicación de la muestra en un secador solar directo, sobre la cinética de secado de ensilado de vísceras de tilapia roja (*Oreochromis sp*). *Información tecnológica*, 31(1), 53-66.
- Candelario, J., Luna, G., Urrea, G., & Ramírez, A. (2017). Determinación de parámetros característicos del proceso de secado en Mango y Zanahoria aplicando modelos cinéticos. *Revista de Simulación y Laboratorio*.
- Carhuallanqui Palian, L., & Zapata Huarcaya, L. A. (2019). *Proceso de secado de la oca (oxalis tuberosa) en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional de Callao, Perú.
- Carhuancho Ayuque, E. M., & Palomino Chauca, J. V. (2021). *Proceso de secado de la papa amarilla (solanum tuberosum) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional del Callao, Perú.
- Castro, A. M., Rodríguez, L., & Vargas, E. M. (2008). Secado de uchuva (*Physalis peruviana L*) por aire caliente con pretratamiento de osmodeshidratación. *Vitae. Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 15, 226-231.

- Ceballos, A. M., Giraldo, G. I., & Orrego, C. E. (2009). Evaluacion de varios modelos de isotermas de adsorcion de agua de un polvo de fruta deshidratada. *Vector*, 107-117.
- Chigal, P. S., Milde, L. B., & Brumovsky, L. A. (2019). Modelado matemático del secado de fideos libres de gluten, influencia de la velocidad del aire.
- Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1—a review. *International Journal of Food Science Technology*, 13(3), 159-174.
- Coloma Paxi, A., Paquita Ninaraqui, R., Velásquez Huallpa, R., & Abarca, R. A. s. (2017). Efecto del escaldado y la temperatura en la cinética de secado de las hojas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), variedad Salcedo INIA. *Agro sur*, 45(3), 66.
- Coral Torres, V. L. (2014). *Determinación proximal de los principales componentes nutricionales de siete alimentos: yuca, zanahoria amarilla, zanahoria blanca, chocho, avena laminada, harina de maíz y harina de trigo integral*. PUCE, Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8924>
- Delgado Delgado, F. V. (2021). *Determinación de isotermas de adsorción, capacidad y la cinética de adsorción de la pepa de aceituna, en la adsorción de As*. (Doctor en Ciencias y Tecnologías Medioambientales), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa - Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/13994/UPdedefv.pdf?sequence=1>
- Della Rocca, P. A., & Mascheroni, R. H. (2011). Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente.
- Espierriz Crespo, J. (2012). *Obtención de curvas de secado de hierba limón (Cymbopogon citratus)*. Universidad Pública de Navarra, Brasil.
- Fick, A. (1855). Ueber Diffusion. In (Vol. 170, pp. 59-86).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). FAOSTAT statistics database. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

- Gamarra Castro, R. J. C. (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, Perú. Recuperado de <https://repositorio.usil.edu.pe/handle/usil/9719>
- García Díaz, R. F., Jiménez, L., Bernal, P. S., Robayo, Ó., Chaparro, M. D., Sierra, F. M., . . . León Sicard, T. (2018). *Tubérculos andinos de vuelta a casa: Conservación participativa de tubérculos andinos en Cundinamarca*. Colombia: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- García Mogollón, C., Torregroza Espinosa, A., & Sierra-Bautista, M. (2016). Cinética de Secado de Chips de Yuca (*Manihot esculenta crantz*) en Horno Microondas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39, 098-103.
- García, S. V., Schmalko, M. E., & Tanzariello, A. (2007). Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 36, 115-129.
- Gavidia Rodríguez, A. B. (2015). *Efecto de la temperatura en isotermas de adsorción de harina de maca (lepidium meyenii)*. Universidad Nacional de Trujillo, Peru.
- Gonzales Cabrera, M. V. (2016). *Innovación de postres incorporando raíces andinas con el fin de rescatar su valor gastronómico en la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador, Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24477>
- González Hurtado, M. I., Porras Barrientos, L. D., Agudelo Florez, A. C., Quintero Cardona, O. A., & Diosa Quintero, C. F. (2014). Determinación de Isotermas de desorción en Jamón de cerdo cocido almacenado entre 4°C y 12°C. *Vitae*, 21(2), 97-106.
- Gualoto Lata, J. A. (2021). *Evaluación nutricional de la oca, mashua, quinua y avena para su uso en la elaboración de muesli*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15542>
- Guamán Lozada, D., Carrera Oña, G., & Martínez Chavez, A. (2021). Drying Kinetics of Oca (*Oxalis Tuberosa*). *The Ecuadorian Journal of STEAM*, 1(5), 1331.

- Gutierrez Balarezo, J., Díaz Viteri, J. E., Mendieta Taboada, O. W., Pulla Huilca, P. V., & Chañi Paucar, L. O. B. A. V. (2019). Conservación de la harina de plátano (*Musa paradisiaca*) en Puerto Maldonado, Madre de Dios. *Biodiversidad Amazónica*, 4(4).
- Gutiérrez Mosqueraa, L. F., Arias Giraldo, S., Garzón Jiménez, D., Martínez Pantoja, D. F., Osorio Alturo, A., & Restrepo López, S. (2015). Modelamiento de la operación unitaria de deshidratación bajo diferentes esquemas de secado. *Vector*, 6, 100-110.
- Hanco Zaga, J. M., & Mamani Ordoñez, P. N. (2017). *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de oca (Oxalis tuberosa Mol) en el proceso de deshidratación a bajas temperaturas asistido por ultrasonido*. Universidad Nacional del Altiplano, Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3975>
- Henderson, S., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- Huamán Yuca, B. Y. (2016). *Isotermas de adsorción de la harina de Castaña (Bertholletia excelsa hbk) en la región de Madre De Dios*. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Perú.
- Ibarz, A., & Barbosa, G. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería en Alimentos* (M. Prensa Ed.). Madrid.
- Jordán Villamar, R. E. (2018). *Desarrollo de una fórmula para un postre instantáneo a partir de harinas de zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) y zapallo (Cucurbita maxima Duchesne)*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10198>
- Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50(2), 385-392.
- Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. J. I. (2016). Modelado matemático del secado de pastas libres de gluten en relación a la temperatura y humedad relativa del aire. *Innotec*, 54-58.

- Lotufo Haddad, A. M. (2019). *Desarrollo y caracterización fisicoquímica y sensorial de productos alimenticios elaborados con tubérculos andinos*. Universidad Nacional de Salta, Salta. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/80706>
- Martínez Navarrete, N., Andrés Grau, A., Chiralt Boix, A., & Fito Maupoey, P. (1999). *Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento Entorno*: Universidad Politécnica de Valencia.
- Matos Chamorro, A., & Rajo Angulo, R. (2010). Influencia del Tamaño de Partículas en las Isotermas de Adsorción del Harina de Haba (*Vicia faba L.*). *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos, 1*.
- Meneses Mariño, W. J. (2021). *Uso potencial de harina de raíces y tubérculos andinos en la industria alimentaria*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15543>
- Mondragón Cazorla, R. (2013). *Estudio de la cinética de secado de gotas de nanofluidos, y caracterización microestructural y mecánica de los gránulos obtenidos*. (Tesis Doctoral), Universitat Jaume I de Castelló, Castellón de la Plana.
- Montes Montes, E. J., Torres Gallo, R., Andrade Pizarro, R. D., Pérez Sierra, O. A., Marimón Escobar, J. L., & Meza Herazo, I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Ingeniería e Investigación*, pp. 45-52. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64328207>
- Montesdeoca Chiriboga, F. R., & Sandiford Lema, B. X. (2022). *Estudio bibliográfico comparativo de polifenoles totales y actividad antioxidante de la zanahoria (*Daucus carota*) y zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas, Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/61519>
- Moreira Chachipanta, S. M. (2018). *Estudio de las condiciones óptimas de almacenamiento de papillas elaboradas a base de harina de papas nativas ecuatorianas (*Solanum andigena*), deshidratadas mediante secado convectivo por aire caliente*. Universidad Técnica de Ambato.

- Navia, D. P., Ayala, A. A., & Villada, H. S. (2011). Isotermas de adsorción de bioplásticos de harina de yuca moldeados por compresión. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9(1), 77-87.
- Noroña Gamboa, L. D. (2018). *Cinética de secado de cereales provenientes de la región centro del Ecuador*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos ..., Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28372>
- Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *EIA*, pp. 119-128.
- Orbe Burbano, J. P. (2020). *Evaluación de la sustitución parcial de grasa por almidones de oca y zanahoria blanca en la calidad de una mortadela tipo Bolonia*. Universidad Politécnica Estatal de Carchi, Carchi. Recuperado de <http://repositorio.upec.edu.ec/handle/123456789/1006>
- Padilla Frías, K. A., Granados Conde, C., Leon Mendez, G., Arrieta Pineda, Y., & Torrenegra Alarcon, M. (2020). Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado. *LIMENTECH Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 16(1), 107-117.
- Page, G. E. (1949). *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers*: Purdue University.
- Palacios Cruz, L., Pérez, M., Rivas Ruiz, R., & Talavera, J. O. (2013). Investigación clínica XVIII. Del juicio clínico al modelo de regresión lineal. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 51, 656-661.
- Pantoja, D. C., Osorio, O., Mejía, D. F., & Váquiro, H. A. (2016). Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum* L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. *Información tecnológica*, 27(1), 69-80. doi:10.4067/S0718-07642016000100009
- Peralta, D., Choque, D., & Rivas, J. (2014). Condiciones de almacenamiento de dos variedades de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a través de modelos matemáticos de isotermas de adsorción.



- Prieto, J., Prieto, F., Román, A. D., Otazo, E. M., & Méndez, M. A. (2012). Correlación de modelos matemáticos de adsorción de humedad en cereales para desayuno. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3, 137-150.
- Quintero, V., Giraldo, G., Lucas, J., & Vasco, J. (2013). Determinación de isothermas de adsorción de agua en biocompuestos de harina termoplástica y fique. *Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 11, 145-146.
- Ramírez Miranda, M., Cruz y Victoria, M., Vizcarra Mendoza, M., & Anaya Sosa, I. (2014). Determinación de las isothermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13, 165-178.
- Restrepo de Peña, B. R., Sierra Borrás, J. E., & Suárez Suárez, N. E. (2017). Importancia de los productos agrícolas del grupo hortofrutícola en la alimentación de poblaciones vulnerables. *CITAS*, 3(1).
- Restrepo Victoria, A. H., & Burbano Jaramillo, J. C. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia et Technica*, 1(27), 127-132.
- Rosas Mendoza, M. E., & Zambrano Zaragoza, M. d. I. L. (2010). Difusión de humedad en harina de amaranto (*Amaranthus cruentus*). 4.
- Saavedra Layza, G. E. (2022). Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de camote (*Ipomoea batata* L.) variedad amarilla mediante la isoterma de GAB. *TAGI* 825, 19-20.
- Salazar, D., Arancibia, M., Ocaña, I., Rodríguez-Maecker, R., Bedón, M., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2021). Characterization and technological potential of underutilized ancestral andean crop flours from Ecuador. *Agronomy*, 11(9), 1693.
- Salcedo Mendoza, J., Contreras Lozano, K., García López, A., & Fernandez Quintero, A. (2016). Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, 883-891.
- Sánchez Castro, F. d. R. (2022). *Caracterización de la oca (Oxalis tuberosa) como base para la elaboración de mermelada*. Escuela Superior Politécnica de

Chimborazo, Ecuador. Recuperado de  
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/17478>

- Sánchez Salmerón, N. (2018). *Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya*. Universidad de Costa Rica Costa Rica.
- Soler Cárdenas, S. (2008). Coeficientes de confiabilidad de instrumentos escritos en el marco de la teoría clásica de los tests. *Educación Médica Superior*, 22(2), 0-0.
- Spiess, W., & Wolf, W. (1983). The Results of the COST 90 project on water activity. IJowitt, R. Escher, F. Hallstron FB Meffer, MF Spiess, WEI Aos, G.(eds.) Physical properties of foods. *AGRIS*.
- Spiess, W., & Wolf, W. (1987). *Water Activity Theory and Applications to Food: Food Science & Technology*.
- Talens Oliag, P. (2017). Determinación de la isoterma de sorción de agua un alimento. *Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos*, 1-2.
- Thompson, T., Peart, R., & Foster, G. (1968). Matllematical simulation of corn drying a new model. *Transaction of the ASAE*, 11(4), 582-586.
- Torregroza-Espinosa, A. M., Montes-Montes, E. J., Ávila-Gómez, A. E., & Remolina-López, J. F. (2014). Kinetic modelling of drying of three varieties of yucca industrial. *Dyna*, 81(186), 188-189.
- Torres Lara, M. A. (2012). *Temperatura y la difusividad másica del secado de plátano verde (musa paradisiaca) de la variedad ingiri*. Universidad Nacional del Centro de Perú, Perú.
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1978). *Water activity and its estimation in food systems*. Paper presented at the Proceedings Int. Symp. Properties of Water in Relation to Food Quality and Stability, Osaka, 1978.
- Vega, A. A., & Lemus, R. A. (2006). Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Información tecnológica*, 17(3), 23-31.

- Vega Gálvez, A., Lara Aravena, E., & Lemus Mondaca, R. (2006). Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). *Food Science Technology*, 26, 821-827.
- Villacrés, E., Quelal, M. B., & Álvarez, J. (2016). *Redescubriendo la oca y la mashua: Desarrollo de nuevos snacks*: Valencia, ES: Académica Española, 2016.
- Vinces Alvear, M. G., & Cabezas Noboa, D. A. (2022). *Productos y Matices del Ecuador*. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/11696>
- Wang, J., Yang, X.-H., Mujumdar, A., Wang, D., Zhao, J.-H., Fang, X.-M., . . . Xiao, H.-W. (2017). Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *LWT*, 77, 337-347.
- Wolf, W., Spiess, W., & Jung, G. (1985). Sorption isotherms and water activity of food materials. *AGRIS*.