



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN
ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA



CARRERA DE ALIMENTOS

Modelado de la cinética de secado e isotermas de adsorción de agua de oca amarilla (*Oxalis tuberosa* variedad amarilla) y oca roja (*Oxalis tuberosa* variedad roja)

Informe final de Integración Curricular, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero 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 Universidad Politécnica de Valencia - Universidad Técnica de Ambato: “Valorización de cultivos andinos para la obtención de ingredientes alimentarios y su viabilidad. Concienciación de su valor nutritivo y funcional”, coordinado por Liliana Acurio, M.Sc. – Resolución Nro. UTA-CONIN-2022-0269-R.

AUTOR: Ariel Joseph Baquerizo Bacilio

TUTORA: Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato – Ecuador

Marzo 2023

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. 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, 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, 13 de febrero de 2023

Ing. MSc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I: 1804067088

TUTORA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Ariel Joseph Baquerizo Bacilio, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final de Integración Curricular, modalidad proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Ariel Joseph Baquerizo Bacilio

C.I: 2450033309

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL 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 consistencia firman:

Presidente del Tribunal

Mg. Santiago Esmiro Cadena Carrera

C.I. 1715602593

MSc. Daniel Alfonso Cabrera Valle

C.I. 1802561595

Ambato, 02 de marzo 2023

DERECHOS DEL AUTOR

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

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final de Integración Curricular, 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 se realice respetando mis derechos de autor.



Ariel Joseph Baquerizo Bacilio

C.I: 2450033309

AUTOR

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicar este paso a mi madre Karen Bacilio, por ser la razón principal por la que deseo ser alguien y hacerla sentir orgullosa; por la paciencia y consejos que me brindó cuando quise renunciar, por ser más que mi madre una amiga a quien le puedo confiar mis problemas y por estar siempre que la necesito.

A mis hermanas Pamela y Alisson, por impulsarme a ser mejor a pesar de la distancia, por las llamadas que me alegraban el día y por apoyarme incluso cuando las cosas se ponían difíciles.

A mis tíos y primos, Gabriel, Miriam, Alexander y Timothy, por acogerme durante varios años en su hogar y hacerme sentir parte de la familia.

A mis más que amigos, los considero como mi hermano y mi hermana, José y Melanie, que, a pesar de vernos pocas veces al año por la distancia, siempre nos impulsamos a seguir adelante y esa amistad se convirtió poco a poco en un sentimiento de familia.

A mi mejor amiga, María José Barreiro, que ha estado presente cada día desde que decidí que quería estudiar en Ambato y me apoyó con fuerzas y consejos que atesoro en mi corazón. Es una persona muy especial para mí y le deseo lo mejor en su vida.

A mis grandes amigas Adriana y Tatiana, que a pesar de todo han estado siempre para mí cuando he necesitado un lugar donde estar, abriéndome las puertas de sus hogares. Espero que Dios las bendiga y sigan adelante, aunque las cosas se pongan difíciles.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora de tesis, la Ing. M.Sc. Liliana Acurio, por brindarme la oportunidad de ser su tutorado, por tener la paciencia para explicarme detalles útiles y por el apoyo brindado. Espero que vaya cumpliendo sus metas en un futuro cercano y que Dios la bendiga por ser tan buena persona.

Agradezco a cada profesor/a que impartió su cátedra de manera enérgica y contagiosa durante estos años, lo cual sirvió para conocer y apreciar más la carrera que decidí seguir, esperando que sigan creciendo tanto profesionalmente como personalmente.

Además, quiero hacer agradecer a mis familiares que de una u otra manera me apoyaron durante el transcurso de mi carrera, aportando económicamente, emocionalmente y brindándome un lugar donde estar y sentirme acogido.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y compañeras que han sido parte de mis experiencias, esperando de todo corazón que cumplan sus metas y anhelos, deseándoles éxito en todo lo que se propongan.

ÍNDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR	<i>i</i>
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	<i>iii</i>
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO	<i>iv</i>
DERECHOS DEL AUTOR	<i>v</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>x</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>xi</i>
RESUMEN	<i>xii</i>
ABSTRACT	<i>xiii</i>
CAPÍTULO I	<i>14</i>
MARCO TEÓRICO	<i>14</i>
1.1. Antecedentes investigativos	<i>14</i>
1.1.1. Desperdicio de alimentos en el mundo	<i>14</i>
1.1.2. Importancia de la agricultura andina	<i>14</i>
1.1.2. Leguminosas y tubérculos andinos producidos en Ecuador	<i>15</i>
1.1.3. Producción de oca (<i>Oxalis tuberosa</i>) y sus variedades	<i>16</i>
1.1.4. Industrialización de la oca (<i>Oxalis tuberosa</i>)	<i>17</i>
1.1.5. Secado de alimentos	<i>17</i>
1.1.6. Isotermas de adsorción	<i>19</i>
1.2. Objetivos	<i>20</i>
1.2.1. Objetivo General	<i>20</i>
1.2.2. Objetivos Específicos	<i>21</i>
CAPÍTULO II	<i>22</i>
METODOLOGÍA	<i>22</i>
2.1. Métodos	<i>22</i>
2.2.1. Obtención de la materia prima	<i>22</i>
2.2.2. Secado de la materia prima	<i>22</i>
2.2.3. Determinación de humedad de la materia prima	<i>22</i>
2.2.4. Modelado matemático de la cinética de secado	<i>22</i>
2.2.5. Isotermas de adsorción	<i>24</i>
2.2.6. Cálculo de la humedad de equilibrio	<i>25</i>
2.2.7. Modelación de las isotermas de adsorción	<i>26</i>
CAPÍTULO III	<i>28</i>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3. 1. Análisis y discusión de los resultados	28
3.1.1. Curva de cinética de secado	28
3.1.4. Curva de la velocidad de secado	42
3.1.5. Isotermas de adsorción	44
CAPÍTULO IV	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
4. 1. Conclusiones	51
4. 2. Recomendaciones	52
MATERIALES DE REFERENCIA	53
Referencias bibliográficas	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor nutricional de la oca expresado en porcentaje (%) por cada 100 gramos de producto	12
Tabla 2. Modelos matemáticos utilizados para el modelamiento de la cinética de secado	15
Tabla 3. Sales que se utilizarán como factor higroscópico	21
Tabla 4. Ecuaciones que se utilizaron para el modelado de las isothermas de adsorción	22
Tabla 5. Modelos matemáticos aplicados en la cinética de secado de la Oca amarilla y Oca roja	37
Tabla 6. Resumen de las constantes obtenidas en el modelamiento de la cinética de secado	38
Tabla 7. Constantes obtenidas con el modelo de BET para la Oca amarilla y Oca roja	46
Tabla 8. Constantes obtenidas con el modelo de GAB para la Oca amarilla y Oca roja	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de las isothermas	16
Figura 2. Tipos de isothermas de adsorción según la IUPAC	17
Figura 3. Curva de secado de la Oca amarilla	24
Figura 4. Curva de secado de la Oca roja	25
Figura 5. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Newton	26
Figura 6. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Page	27
Figura 7. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Page modificado	29
Figura 8. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Henderson y Pabis	30
Figura 9. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Logaritmico	32
Figura 10. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Thomson	33
Figura 11. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Fick	34
Figura 12. Curva de velocidad de secado de la Oca amarilla	40
Figura 13. Curva de velocidad de secado de la Oca roja	41
Figura 14. Isotherma de adsorción de la Oca amarilla	43
Figura 15. Isotherma de adsorción de la Oca roja	43
Figura 16. Comparación de las isothermas de adsorción de Oca amarilla y Oca roja	44

RESUMEN

La Oca amarilla y Oca roja son tubérculos que contienen una gran cantidad de agua lo que los convierte en un alimento perecedero. El secado es un proceso donde se reduce la cantidad de agua del alimento, mediante el intercambio masa y calor entre la matriz y el aire caliente. En este estudio se realizó el secado de estos tubérculos a 65 grados centígrados por un periodo de 8 horas. El análisis de la cinética de secado permitió determinar la humedad crítica que arrojó valores de 0,059 kg de agua sobre kg sólido seco y 0,086 kg de agua sobre kg de sólido seco para Oca amarilla y roja, respectivamente. Además, se emplearon siete modelos matemáticos comúnmente usados para el análisis de la cinética de secado en alimentos (Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Logarítmico, Thomson y Fick), y se observó que el modelo que mejor ajuste presenta es el de Newton.

Por otra parte, se construyeron isotermas de adsorción con el uso de sales que se encontraron en un rango de actividad de agua de 0,11 hasta 0,8. Se determinó que las harinas de Oca amarilla roja generan isotermas de tipo II. Los datos de éstas fueron ajustados a los modelos matemáticos de BET y GAB, y se determinó que el modelo que mejor se ajusta a los datos es de GAB, debido al rango en el que trabaja.

Palabras claves: Modelo de Newton, modelo de Page, modelo de Fick, GAB, BET, isotermas de adsorción, Oca amarilla, Oca roja, Cultivos andinos

ABSTRACT

The Yellow Oca and Red Oca are tubers that contain a large amount of water, which makes them perishable food. Drying is a process where the amount of water in the food is reduced through mass and heat exchange between the matrix and hot air. In this study, these tubers were dried at 65 degrees Celsius for 8 hours. The analysis of the drying kinetics allowed it to determine the critical humidity, which yielded values of 0.059 kg water on kg dry solid and 0.086 kg water on kg dry solid for yellow and red Oca, respectively. In addition, seven mathematical models commonly used for analyzing drying kinetics in foods were used (Newton, Page, modified Page, Henderson, and Pabis, Logarithmic, Thomson, and Fick), and it was observed that the model that best fits is Newton's.

On the other hand, adsorption isotherms were built using salts found in a water activity range of 0.11 to 0.8. It was determined that the yellow and red Oca meals generate type II isotherms. The data from these isotherms were adjusted to the mathematical models of BET and GAB. It was determined that the model that best fits the data is GAB due to the range in which it works.

Keywords: Newton model, Page model, Fick model, GAB, BET, adsorption isotherms, yellow goose, red goose, Andean crops

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

1.1.1. Desperdicio de alimentos en el mundo

A nivel mundial hay un alto porcentaje de alimentos que se desperdician desde el momento de su cultivo y aún más durante las etapas de procesamiento, distribución e incluso en el domicilio del consumidor. Según datos recabados de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018), hasta el año 2018 un tercio de la producción de alimentos se desperdicia a nivel mundial, lo que representa alrededor de 1.300 millones de toneladas y esta cantidad sería suficiente para que 2000 millones de personas puedan alimentarse completamente. En América Latina se estima que se pierde un 28% de alimentos durante la producción, un 22% durante el almacenamiento de los alimentos procesados, un 7% en la distribución y 28% durante el consumo (Guevara, 2021).

Se aproxima que este desperdicio genera una pérdida económica de alrededor de un billón de euros (Hidalgo & Martín, 2020). Además del tema económico, los desperdicios alimenticios generan consecuencias graves a nivel ambiental y social. En primer lugar, al momento de producir o elaborar alimentos es imposible no generar dióxido de carbono, el cual es un gas tóxico que afecta al cambio climático.

Considerando lo expuesto, es comprensible la necesidad de conocer a profundidad los métodos de procesamiento de alimentos, con la finalidad de disminuir el desperdicio de los alimentos, sin afectar la calidad tanto sensorial como nutricional (Ochoa, 2022).

1.1.2 Importancia de la agricultura andina

En cuanto a la importancia de la agricultura andina es factible hacer mención que las condiciones climáticas, como el alto nivel de humedad, las temperaturas bajas y las grandes cantidades de irradiación, contribuyeron al desarrollo de especies únicas en el mundo (Viera-Arroyo et al., 2020).

El 7 % del territorio ecuatoriano está conformado por páramos andinos, cuya altitud alcanza aproximadamente los 3300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Los suelos debido a la baja densidad que poseen, presentan una textura porosa que favorece la conductividad y retención de agua, esto facilita el desarrollo de flora endémica y no endémica, y por ende exhiben una gran diversidad (Morocho & Chunchu, 2019). Entre los cultivos andinos se encuentran tubérculos como la mashua, oca y papa andina, raíces como la jícama, maca, zanahoria blanca, y granos como la quinua, chocho y amaranto (Iza Arias, 2022).

En el año 2018 el centro peruano de estudios sociales (CEPES), mostró el crecimiento de la agricultura andina en varios países latinoamericanos como es el caso de Ecuador, Bolivia, Perú, Chile, Colombia y Venezuela. En Ecuador el valor agregado bruto real en el sector agropecuario incrementó aproximadamente un 37% en la década que entre el 2008 y 2018 (Albuja Illescas, Basantes Vizcaíno, & Aragón Suárez, 2020). Además, el índice de productividad se considera estable, lo que se atribuye a que el modelo de la producción ecuatoriana no sufrió cambios a lo largo de los años (Eguren, 2018).

Finalmente, también se puede destacar el enfoque social que rescata la agricultura andina, ya que sirve como un sustento para las familias que sobreviven con los productos obtenidos en esta actividad (Jiménez-Esparza, 2019).

1.1.2. Leguminosas y tubérculos andinos producidos en Ecuador

En la zona andina ecuatoriana se produce una variedad de tubérculos a lo largo de la zona que comprende las provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Loja, y Cañar. Entre las especies que podemos encontrar están los cultivos de chocho, quinua, amaranto, arveja, zanahoria blanca, papa china, achira, jícama, oca, mashua, camote, entre otras (INIAP, 2023). La producción de estas en los últimos años ha sido mayor debido a la alta demanda del consumidor; sin embargo, aún no alcanzan la producción masiva debido principalmente al desconocimiento de su valor nutricional. Los tubérculos contienen de 65 a 85% de almidón en peso seco y presentan altos índices de vitaminas como la C y la A; además, son especies ricas en minerales y sustancias químicas como flavonoides, antocianinas, entre otros (Ocaña Palacios, 2019).

1.1.3. Producción de oca (*Oxalis tuberosa*) y sus variedades

La oca (*Oxalis tuberosa*) crece aproximadamente entre los 3000 – 4000 m.s.n.m., siendo el clima templado y frío el óptimo para su desarrollo. Pertenece a la clase dicotiledónea, orden Geranial, familia Oxalidaceae, género *Oxalis*, y su especie es *Oxalis tuberosa* Molina. Se considera una planta anual y llega a medir entre los 10 y 40 cm. La oca puede clasificarse en función del color y la textura del tubérculo; por ejemplo la oca blanca y la chaucha se caracterizan por tener una textura lisa, mientras que las variedades amarilla, roja, chaquilula, vicunda y mareña se caracterizan por tener una textura crespada (Espinosa, Vaca, Abad, & Crissman, 1997).

El valor nutricional de la oca es similar casi entre todas sus variedades (Tabla 1); sin embargo, es de conocimiento general que su composición cambia con el transcurso de su maduración, proceso que comúnmente se realiza mediante exposición al sol por alrededor de 5 a 7 días. El sol provoca que los carbohidratos complejos se conviertan en azúcares; sin embargo, se debe tomar en cuenta que durante el proceso se genera una pérdida de humedad, por ejemplo, la oca fresca tiene un 82,4 % de agua, mientras que la madurada mediante exposición solar tiene un 66,9 % de agua, aproximadamente. Así mismo las calorías aumentan de 67 a 128 kcal durante este proceso (Medina Ochoa, 2022). La oca presenta valores considerables de fibra, fósforo, carotenos, tiamina, niacina y vitamina C (Gualoto Lata, 2021), y valores superiores de calcio, hierro y riboflavina, frente a la papa y el maíz (Zhu & Cui, 2020).

Tabla 1. Valor nutricional de la oca expresado en porcentaje (%) por cada 100 gramos

Ceniza	Humedad	Grasa	Fibra	Hidratos de carbono	Proteína	Referencia
5,91	61	3,55	5,91	82,42	5,91	Robles Condori (2016)
5,5	77,46	1,65	3,37	82,29	6,87	Hanco y Mamani (2017)
4,39	82,4	0,54	2,74	88,46	3,84	Palate Amaguaña (2012)
3,39	77,73	1,66	2,16	88,19	4,6	Espín, Villacrés, y Brito Grandes (2004)
5,9	86,79	3,55	5,9	78,8	5,82	León Marrón, Villacorta González, y Pagador Flores (2011)

Fuente: Gualoto Lata (2021)

1.1.4. Industrialización de la oca (*Oxalis tuberosa*)

De manera tradicional la oca se prepara salteada, acompañan con cebolla colorada, pimienta, ajo, cilantro, pimienta y aceite vegetal. Sin embargo, a lo largo del tiempo han ido aumentando sus procesos de industrialización. Por ejemplo, se elabora néctar a partir de la oca troceada y triturada. Para la elaboración se añade alfa-amilasa, agua, azúcar, carboximetilcelulosa (CMC), ácido cítrico y sorbato de potasio. La mezcla se calienta a 73 °C con el objetivo de aumentar los ° Brix de 6 a 18° (Muenala Terán, 2021).

Otro producto que se elabora comúnmente es la mermelada de oca. Para ello el tubérculo se somete a una precocción, posteriormente se realiza la extracción de la pulpa y la adición de azúcar y espesante, y finalmente la mezcla se lleva a cocción. A manera industrial se adiciona un conservante, se envasa, se enfría y se almacena para su distribución y consumo (Llanos Arias, Llanos Arias, & Chipana Mendoza, 2019; Sánchez Castro, 2022).

Así mismo hay estudios que detallan el proceso de elaboración de harina. En este caso las ocas seleccionadas son laminadas (espesor de 3 mm) y deshidratadas en un equipo de convección forzada. Finalmente, las láminas secas se muelen dando lugar a la harina (Acebey Colque, 2018; Garcés Hernández, 2019; Rojas Rojas, 2019).

Finalmente existen investigaciones que detallan el proceso de elaboración de vodka elaborado a partir de oca y papa china. Este proceso parte de la recepción y lavado de las materias primas. Posteriormente se pela, trocea, se acondiciona a 55°C y se pone en contacto con enzimas (alfa-amilasa y gluco-amilasa). La fermentación se realiza a 30 °C con la adición de levadura. Previo al embotellado, la solución se filtra y se destila entre 79 y 85 °C (Ordóñez, 2022).

1.1.5. Secado de alimentos

Para la industria alimentaria es importante el estudio profundo de las diferentes tecnologías de procesamiento que se utilizan para elevar el tiempo de vida útil de los alimentos, con el objetivo de poder optimizar los procesos y con ello alterar mínimamente el valor nutricional.

Uno de los procesos ampliamente aplicados a nivel industrial es el secado de alimentos. De manera simplificada, este proceso tiene su base en remover el agua libre utilizando aire caliente. El principal beneficio del secado, de manera general, es la preservación de los alimentos. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que los alimentos tienen componentes termolábiles, termosensibles y volátiles (Padilla-Frías, Granados-Conde, Leon-Mendez, Arrieta Pineda, & Torrenegra-Alarcon, 2018).

Existen ciertos factores que se deben tener presentes cuando se realiza algún tipo de secado; estos factores son: la humedad, humedad relativa, composición (tanto física como química del alimento), área del producto, entre otros. Otro aspecto a considerar es el tiempo de secado, ya que se busca establecer un equilibrio entre el valor de humedad que evita el deterioro y el punto en el que se minimizan los daños a nivel sensorial y nutricional (Bécquer Frauberth, Leonardo Ederson, Torres, Massipe Hernández, & Quispe Flores, 2020).

La cinética de secado hace referencia a los modelos matemáticos que son usados para explicar cómo funciona el proceso en sí. Existe una amplia gama de modelos, siendo los más utilizados en el campo científico los que se muestran en la Tabla 2. El reto es determinar el modelo que mejor se ajuste al comportamiento de cada alimento.

Tabla 2. Ecuaciones utilizadas para el modelamiento de la cinética de secado

Modelo	Ecuación
Newton	$MR = \text{Exp}^{-kt}$
Page	$MR = \text{Exp}^{-kt^n}$
Page modificado	$MR = \text{Exp}^{[-kt]^n}$
Henderson y Pabis	$MR = a \times [\text{Exp}^{-kt}]$
Logarítmico	$MR = a \times [\text{Exp}^{-kt}] + c$
Thomson	$MR = 1 + at + bt^2$
Fick	$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \text{Exp} \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 \times L^2} \times t \right]$

Fuente: Montes Montes et al. (2008); (Salcedo-Mendoza, Contreras-Lozano, García-López, & Fernández-Quintero, 2016).

1.1.6. Isotermas de adsorción

De manera general, una isoterma de adsorción es una gráfica en la cual se visualiza la relación entre la humedad de un alimento frente a la actividad de agua. Se consideran de mucha importancia debido a que son una guía para la predicción de los cambios que ocurren en la estabilidad de los alimentos conforme el tiempo, en otras palabras a partir de ellas se puede determinar el tiempo de vida útil (Vega Gálvez, Lara Aravena, & Lemus Mondaca, 2006).

La Figura 1 muestra una isoterma típica. Se observan claramente 3 zonas predominantes. En la zona A las moléculas acuosas están muy ligadas al material, en la zona B se presentan las multicapas acuosas las cuales están unidas de manera débil y en la zona C se presenta la forma en solución (Cartagena Gordillo, 2022).

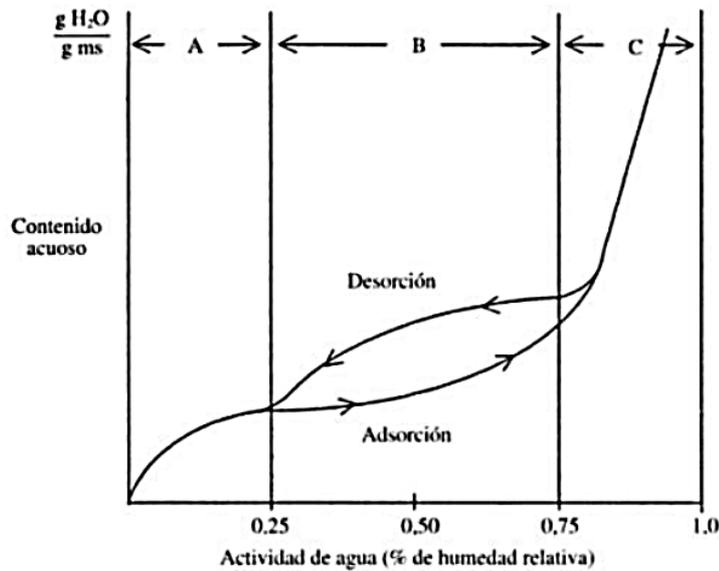


Figura 1. Representación de las isotermas

Fuente: Mina Medina (2022)

Existen 6 tipos de isotermas de adsorción (Figura 2). Las isotermas tipo I, conocidas como similares, corresponden a sólidos micro porosos; tomando en cuenta que estas matrices tienen un límite de absorción, presentan isotermas con forma cóncava hacia el eje de las abscisas. Por otra parte, el tipo II es conocida como isoterma sigmoidea, corresponde a un material sólido poroso y hace referencia a que existe absorción en la monocapa y en la multicapa.

La isoterma tipo III o isoterma de Flory-Huggins es representativa de materiales no porosos y macro porosos; su forma se debe a la relación nula entre el adsorbente y adsorbato. La isoterma de adsorción tipo IV es característica de los materiales meso porosos, mientras que la isoterma tipo V o isoterma de adsorción multicapa BET, es una de las menos frecuentes debido a que presenta histéresis; sin embargo, esta última se presenta también en materiales meso porosos. Finalmente la isoterma tipo VI es la representación de la absorción en la multicapa en una superficie uniforme (Caiza Mañay, 2021; Sierra Puga & Allca Ayala, 2022).

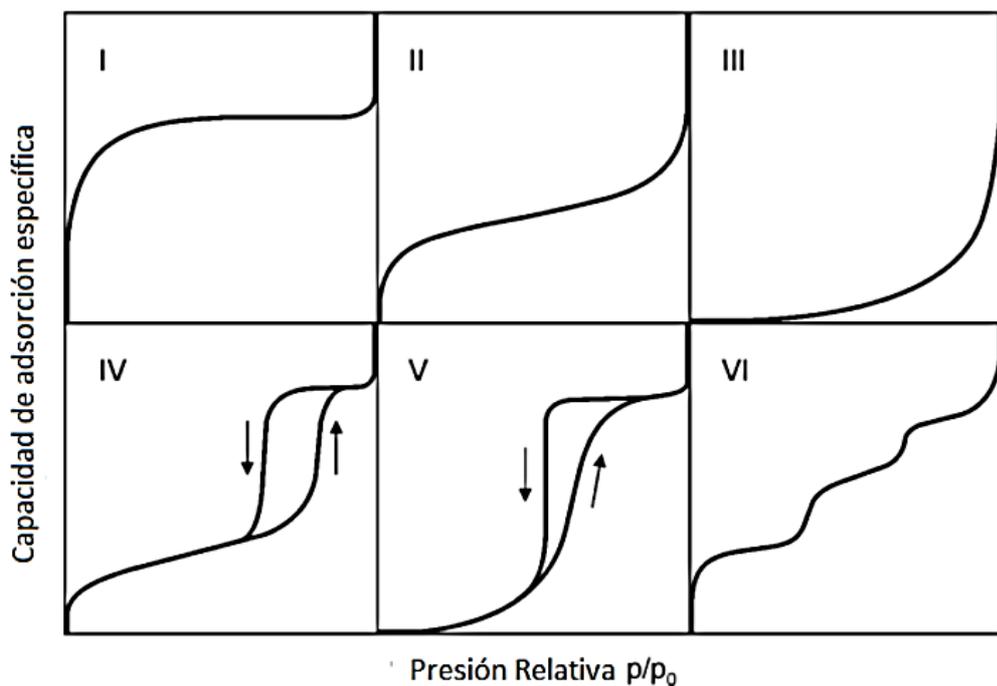


Figura 2. Tipos de isothermas de adsorción según la IUPAC.

Fuente: Osorio (2018).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Modelar la cinética de secado e isoterma de adsorción de agua de oca amarilla (*Oxalis tuberosa* variedad amarilla) y oca roja (*Oxalis tuberosa* variedad roja).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Construir la curva de cinética de secado de oca amarilla (*Oxalis tuberosa* variedad amarilla) y oca roja (*Oxalis tuberosa* variedad roja).
- 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. Métodos

2.2.1. Obtención de la materia prima

Las materias primas se obtuvieron en un mercado local de Ambato. Una vez en el laboratorio se realizó un control de calidad visual y se seleccionaron aquellas matrices con mejores características. Posteriormente se lavaron con una corriente de agua fría y se secaron al sol por 5 días, contados a partir de la cosecha. Este proceso se realizó debido a que contribuye a la reducción del amargor de la muestra.

2.2.2. Secado de la materia prima

Las matrices se pelaron, se cortaron en rodajas de aproximadamente 2 mm y se sometieron a un pretratamiento con microondas (750 W/20 s), cuya finalidad fue evitar pardeamiento debido a la acción enzimática. Posteriormente las rodajas se secaron en un deshidratador por convección (Gander mtn – CD 160) a 65 °C durante 8 h. Se tomaron los valores del peso de las muestras cada 10 minutos durante las 2 primeras horas, y posteriormente cada 30 minutos.

2.2.3. Determinación de humedad de la materia prima

El contenido en agua de la muestra fresca y seca se determinó utilizando una balanza de humedad de marca KERN (MLS 50-3).

2.2.4. Modelado matemático de la cinética de secado

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

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

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

X_o = Humedad inicial (Kg agua/Kg b.s.)

X_e = Humedad en equilibrio (Kg agua/Kg b.s.)

Posteriormente se acoplaron los datos obtenidos durante el secado a los modelos 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; Obando Moreno & Vega Vega, 2019).

$$MR = Exp(-kt) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

k = constante obtenida de la curva

$$MR = Exp(-kt^n) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

k y n = constantes obtenidas de la curva

$$MR = Exp^{[-(kt)^n]} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

k y n = constantes obtenidas de la curva

$$MR = a[Exp^{(-kt)}] \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

k y a = constantes obtenidas de la curva

$$MR = a[Exp^{(-kt)}] + c \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

k, c y a = constantes obtenidas de la curva

$$MR = 1 + at + bt^2$$

Ecuación 7

$$t = a \times \ln(MR) + b \times [\ln(MR)]^2$$

Donde:

MR = Razón de humedad

b y a = constantes obtenidas de la curva

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 \times D_{eff}}{4 \times L^2} \times t \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

MR = Razón de humedad

n = Número de mediciones realizadas

D_{eff} = Coeficiente de difusividad

L = Semi espesor de la lámina

2.2.5. Isotermas de adsorción

Se empleó el método gravimétrico estático propuesto por W. E. Spiess y Wolf (1987) y Wolf, Spiess, y Jung (1985). Se pesaron las cápsulas con las muestras respectivas y se colocaron en depósitos herméticos con humedad relativa controlada (entre 11 y 80%) mediante el uso de sales sobresaturadas (Tabla 3) a 20 °C ± 3 °C.

Las sales actuaron como factores higroscópicos, cediendo o retirando humedad al ambiente, hasta alcanzar el estado de equilibrio másico (humedad relativa constante) (Caiza Mañay, 2021; González, Espinoza, Cañizares, & Méndez, 2008). Los valores de actividad de agua reportados en la Tabla 3 se determinaron utilizando el medidor de actividad de agua AquaLab (modelo 4TE).

Las muestras se pesaron durante 2 meses, en primer lugar cada 15 días y luego cada 30 días, en una balanza analítica de precisión 0,0001 g marca Ohaus (modelo Adventure-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 que se utilizarán como factor higroscópico

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

Fuente: Alvarado y Aguilera (2001).

Las soluciones salinas que se utilizaron fueron de grado reactivo y el método de preparación fue el mismo que adoptaron W. E. Spiess y Wolf (1987).

2.2.6. Cálculo de la humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio w_e se calculó por diferencia de peso mediante la Ecuación 9.

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

Donde:

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

P_0 = peso inicial de la muestra

w_0 = humedad inicial de la muestra

ΔP = la variación de masa (equilibrio y peso inicial)

2.2.7. Modelación de las isotermas de adsorción

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

Tabla 4. Ecuaciones que se utilizaron para el modelado de las isotermas de adsorción

Modelo	Ecuación	N° 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: w_e = humedad de equilibrio (g agua/g sólidos secos), w_0 = humedad en la monocapa (g agua/g sólidos secos), C = constante relacionada con el calor de sorción</p>	Ecuación 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: w_e = humedad de equilibrio (g agua/g sólidos secos), w_0 = humedad en la monocapa (g agua/g sólidos secos), C = constante relacionada con el calor de sorción en la monocapa K = constante relacionada con el calor de sorción en las multicapas</p>	Ecuación 11

La calidad de ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de determinación (r^2), el cual debe ser superior a 0,85 para lograr un buen modelado de datos experimentales. Además se determinó el error medio estimado (Ecuación 11) y el porcentaje de desvío medio relativo (Ecuación 12) (Montes Montes et al., 2008).

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

Donde:

SE = Error medio estimado

V_{exp} = Humedad experimental

V_p = Humedad predicho (calculado a partir de cada modelo)

GRL = Número de observaciones

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|V_{exp} - V_p|}{V_{exp}}$$

Ecuación 13

Donde:

P = Porcentaje de desvío medio relativo

V_{exp} = Humedad experimental

V_p = Humedad predicho (calculado a partir de cada modelo)

n = Número de observaciones

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. 1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Curva de cinética de secado

Las Figuras 3 y 4 muestran la curva experimental que relaciona la humedad en base seca frente al tiempo de la Oca amarilla y Oca roja, respectivamente. Se evidencia un descenso brusco de humedad en los primeros minutos de secado, tendencia que se mantuvo hasta los 180 minutos aproximadamente en ambas muestras. Este cambio de tendencia se debe a que el alimento ha transferido la mayor cantidad de agua libre (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019). Similar comportamiento fue observado en pituca, malanga o taro (*Colocasia esculenta*), un tubérculo muy popular en Asia, así como en Oceanía y África (Obando Moreno & Vega Vega, 2019). La tasa de pérdida de humedad en la primera fase descendiente es de $0,04 \text{ kg agua/kg sólido seco} \times \text{minuto}$, para Oca amarilla y roja respectivamente; mientras que la misma tasa desciende a un valor de $0,002 \text{ kg agua/kg sólido seco} \times \text{minuto}$ para Oca amarilla y Oca rojo respectivamente.

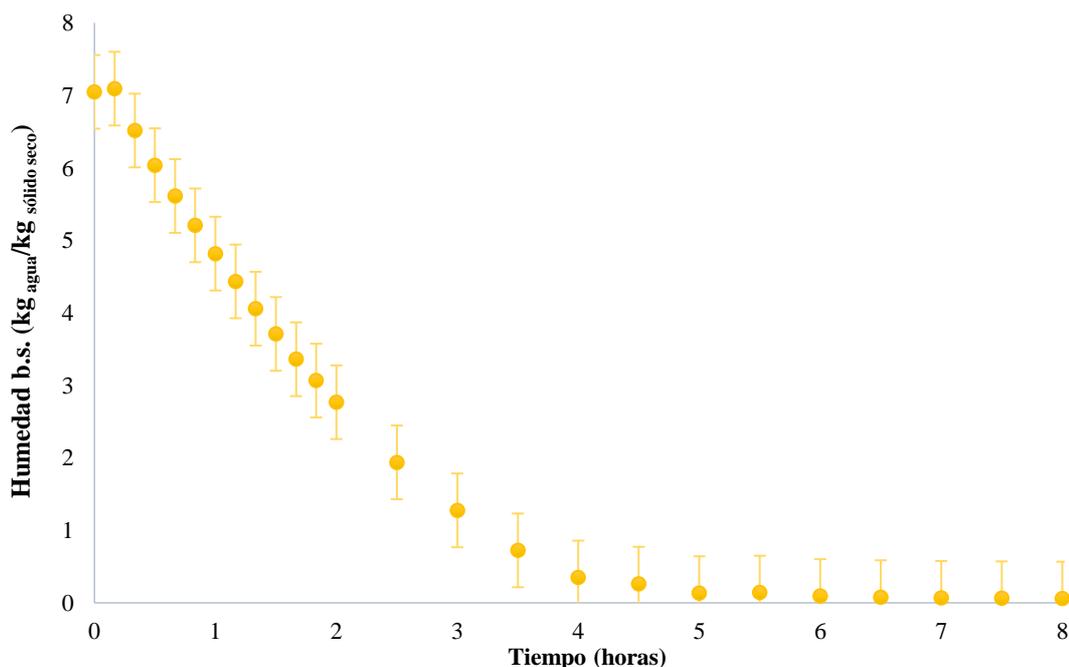


Figura 3. Curva de secado de la Oca amarilla

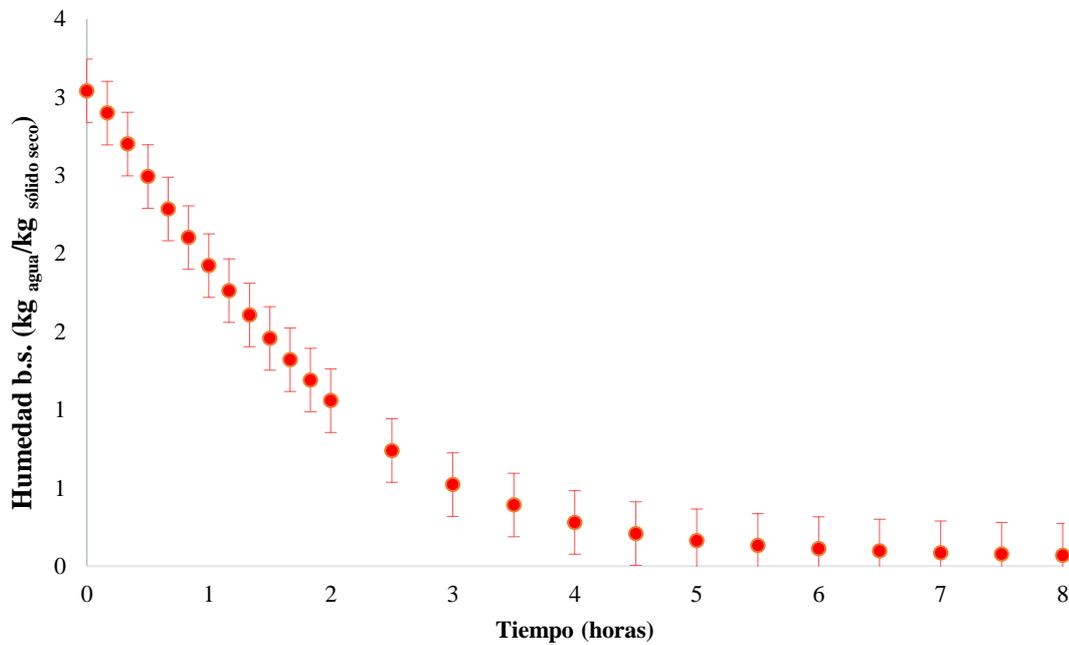


Figura 4. Curva de secado de la Oca roja

Los datos obtenidos en la cinética de secado fueron ajustados a los diferentes modelos matemáticos propuestos en la metodología. El ajuste de los valores al modelo de Newton permitió obtener las gráficas reportadas en la Figura 5.

Para analizar la correlación entre las variables razón MR y tiempo, que presenta cada modelo matemático estudiado, se utilizó el coeficiente de determinación (r^2); se tomó como referencia que un valor cercano a 0,5 denota una correlación moderada y que valores superiores a 0,8 enfatizan una correlación óptima entre los datos (Palma, 2022). En ambas muestras este valor fue superior a 0,97 lo que indica una excelente relación entre las variables. Este modelo ha mostrado un ajuste óptimo en alimentos como el Taikor (*Garcinia pedunculata* Robs.), con un coeficiente de determinación a 55°C de 0,9366; además, observaron una relación directamente proporcional entre el valor de R^2 y la temperatura de secado (Hossain, Dey, & Joy, 2021).

La constante de secado (k) de la Oca amarilla arrojó un valor de $1,02 \text{ h}^{-1}$, mientras que para la oca roja un valor de $0,77 \text{ h}^{-1}$. Hay evidencia científica que indica que esta constante depende de la velocidad del aire que se emplea en el secador. Además, depende de las coordenadas en el espacio, que hace referencia al punto donde se ubican las muestras en el deshidratador (Gómez, 2009).

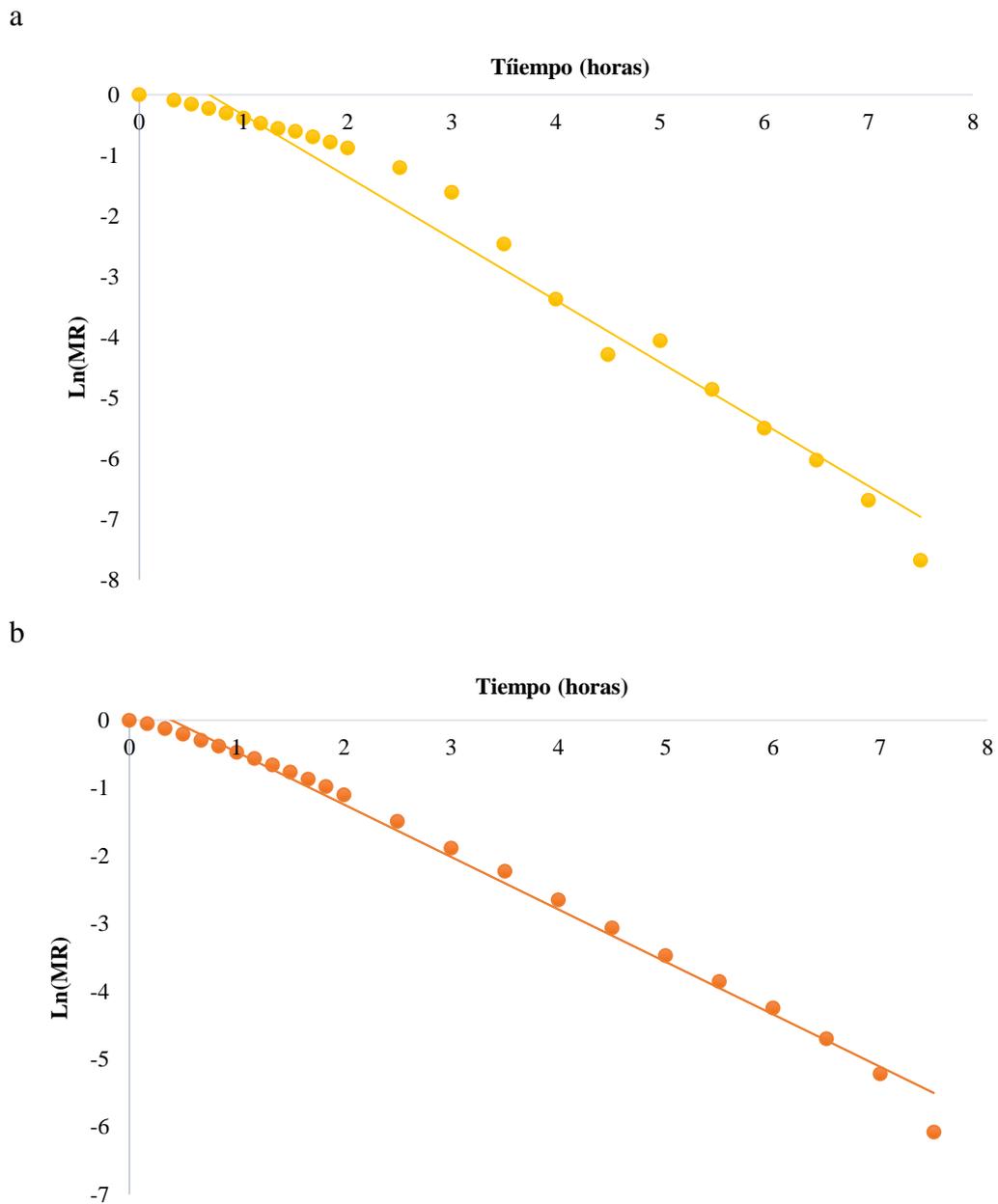


Figura 5. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Newton
a. Oca amarilla, b. Oca roja

Por otra parte, el modelo de Page arroja curvas cóncavas con tendencia ascendente (Figura 6). El coeficiente de determinación (r^2) en este modelo muestra un ajuste perfecto, con valores superiores a 0,99 en ambas muestras. Este modelo ha mostrado un ajuste similar en alimentos como el kiwi (*Actinidia deliciosa*) que a una temperatura de 45°C evidenció un coeficiente de determinación de 0,9994 y para una temperatura de 65°C un valor de 0,9999 (Wang, Xiao, Ye, Wang, & Raghavan, 2019).

Los valores de la constante de secado (k) con este modelo arrojan valores de 0,38 y 0,47 h^{-1} para Oca amarilla y roja respectivamente los cuales son un poco similares. Mientras que los valores de n obtenidos fueron de 1,46 y 1,24 respectivamente. Según Simal, Femenia, Garau, y Rosselló (2005), esta última constante en alimentos oscila en un rango de 1,05 a 2,05 y depende del tipo de alimento analizado.

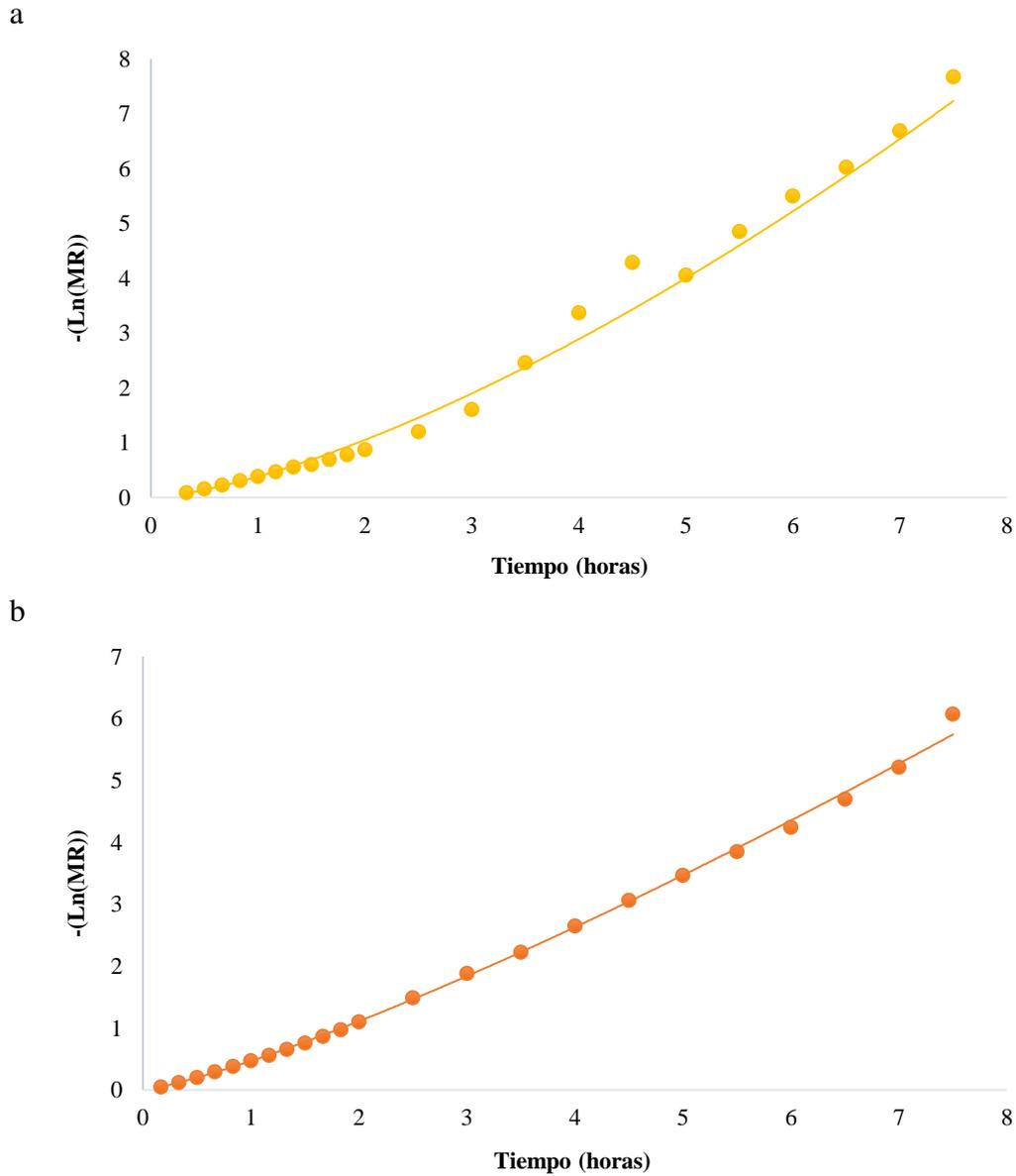
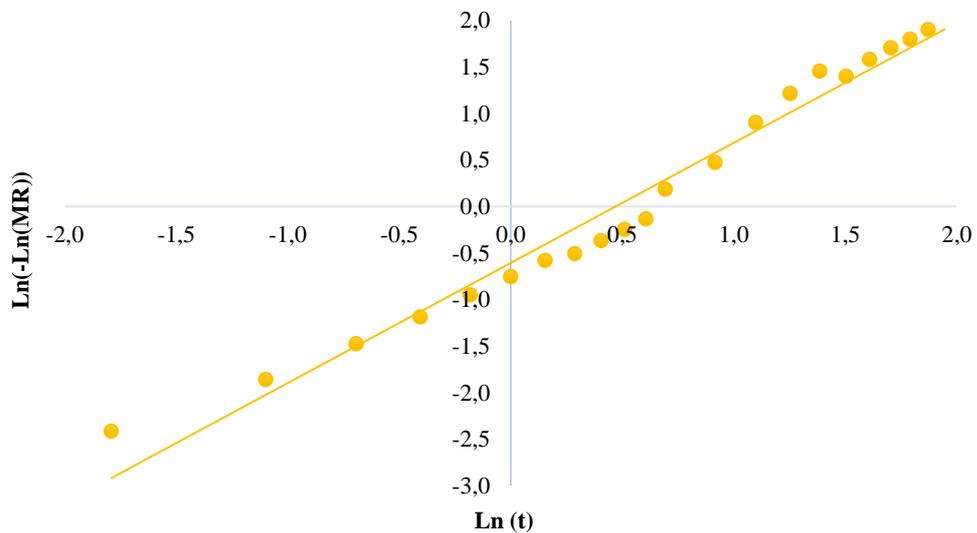


Figura 6. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Page
a. Oca amarilla, b. Oca roja

El siguiente modelo empleado fue el modelo de Page modificado, obteniéndose valores k de 0,6 y 0,54 h^{-1} y valores de n de 1,29 y 1,24 para la Oca amarilla y roja respectivamente (Figura 7).

Este modelo ha mostrado un ajuste similar en alimentos como cúrcuma (azafrán), secadas en microondas a 30, 50, 80 y 100 W, presentando valores de n de 1,38, 1,62, 1,61 y 1,63, respectivamente (Surendhar, Sivasubramanian, Vidhyeswari, & Deepanraj, 2019). Sharma, Verma & Pathare (2005) citados por Chigal, Milde, y Brumovsky (2019), mencionan que la constante k en este modelo depende tanto de la velocidad de secado como de la temperatura; mientras que n solo depende de la temperatura; debido a que solo se utilizó una temperatura para el secado no es posible evidenciar la influencia. De igual manera los valores de n observados en la cinética de secado de pulpa de cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas, mostraron la dependencia con la temperatura (Zuniga Giraldo et al., 2010).

a



b

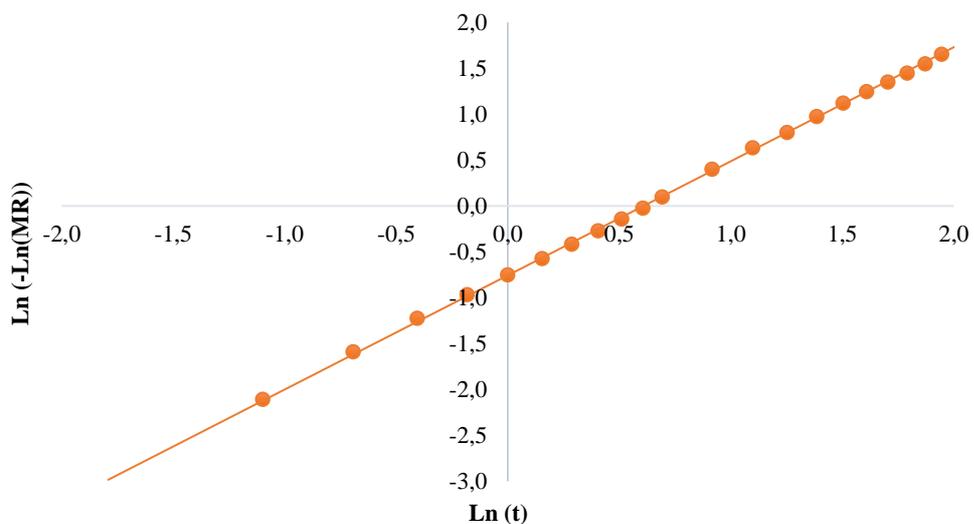


Figura 7. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Page modificado
a. Oca amarilla, b. Oca roja

En cuanto al modelado de Henderson y Pabis la tendencia de la curva es cóncava (Figura 8). En este modelo la constante de secado (k) presentó valores de 0,92 y 0,7 h⁻¹ para la Oca amarilla y Oca roja respectivamente.

Mientras que los valores de la constante a fueron 2,14 y 1,44 para Oca amarilla y roja respectivamente. Una investigación realizada en albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.), registró un valor de a de 1,012 (Altay, Hayaloglu, & Dirim, 2019), inferior a los valores registrados para Oca amarilla y roja.

Al analizar diferentes estudios se evidencia que esta constante tiene relación con las condiciones de secado. Por ejemplo, Syah (2022), menciona la relación de esta constante con las coordenadas de ubicación del alimento en el deshidratador, ya que en su experimento realizado en rodajas de plátano (*Musa paradisiaca* L.) observó diferentes valores dependiendo de las posiciones de las bandejas, siendo mayores los valores de a mientras más altas estaban ubicadas las bandejas dentro del equipo utilizado en el experimento.

Por otra parte, el secado de café arábico (*Coffea arabica* L.) con temperatura y humedad relativa controlada, arrojó un valor de a de 1,05 para una temperatura de 50°C, 1,04 para 60°C y 1,03 para 70°C; sin embargo, los autores concluyeron que no existen diferencias significativas entre los valores observados (Phitakwinai, Thepa, & Nilnont, 2019).

Además, en el secado de papa negra, frafra o papa Hausa (*Plectranthus rotundifolius*) se registraron valores de 0,7447, 0,8098 y 0,8117 para temperaturas de 70°C, 80°C y 90°C, respectivamente (Paramita et al., 2020). Con los datos mencionados anteriormente es posible mencionar que el valor de a presenta una relación directamente proporcional con la temperatura, aunque en algunos casos las diferencias no sean significativas.

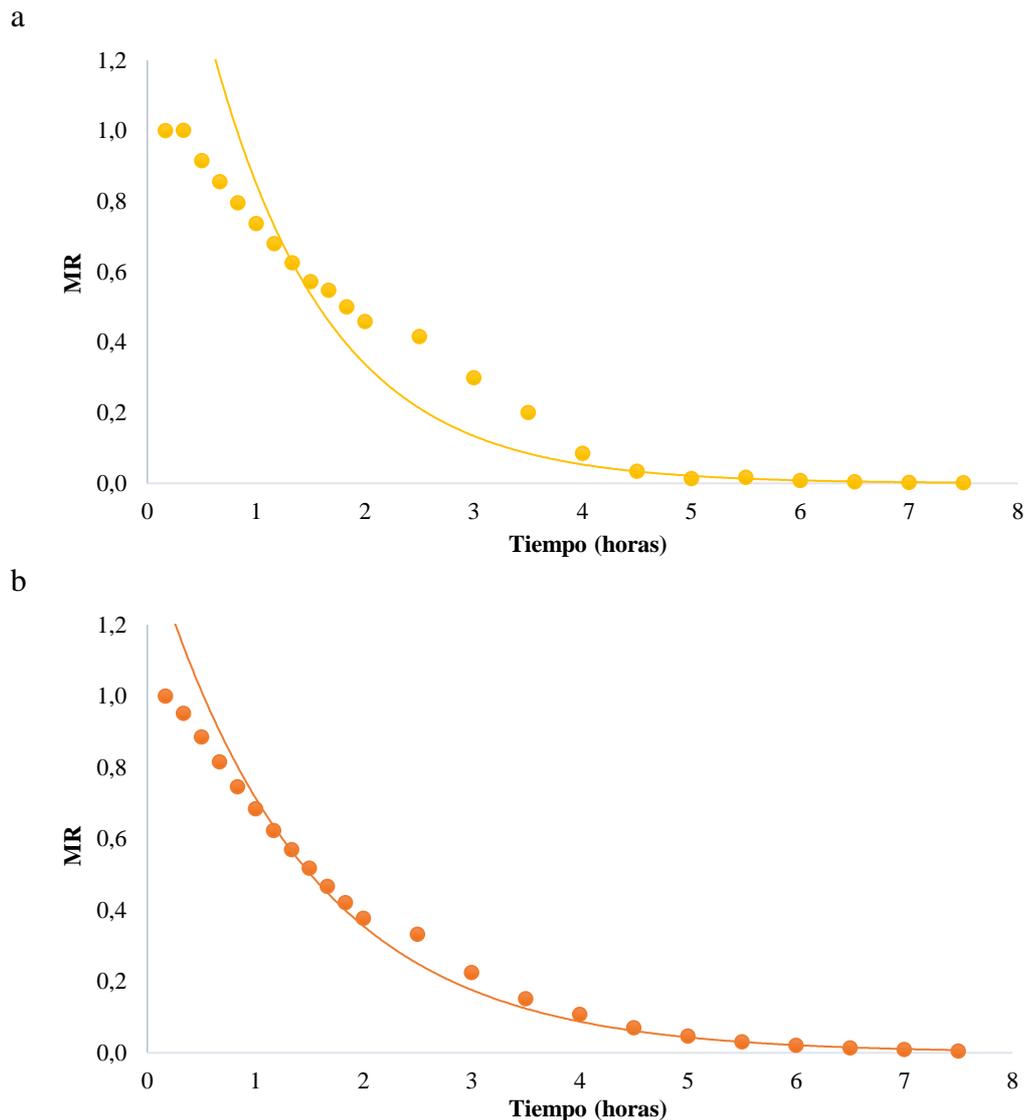


Figura 8. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Henderson y Pabis
a. Oca amarilla, b. Oca roja

La Figura 9 presenta el ajuste del modelo Logarítmico. La constante a registró un valor de 0,337 para la Oca amarilla y un valor de 0,321 para la Oca roja. Mientras que la constante c presentó valores de 0,65 y 0,61 respectivamente. Estos datos se relacionan con los reportados por Reyes, Baquerizo, Pro, Molina, y Gavilanes (2021), en un estudio realizado en hojas de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae). Por otra parte, un estudio realizado en chufa (*Cyperus esculentus*), arrojó valores de a de 1,06 y 0,012, respectivamente; mientras que la constante c varió considerablemente con el aumento de la temperatura (70°C: 0,99, 60°C: 0,005 y 50°C: 0,074) (Abano, Akanson, & Kizzie-Hayford, 2021).

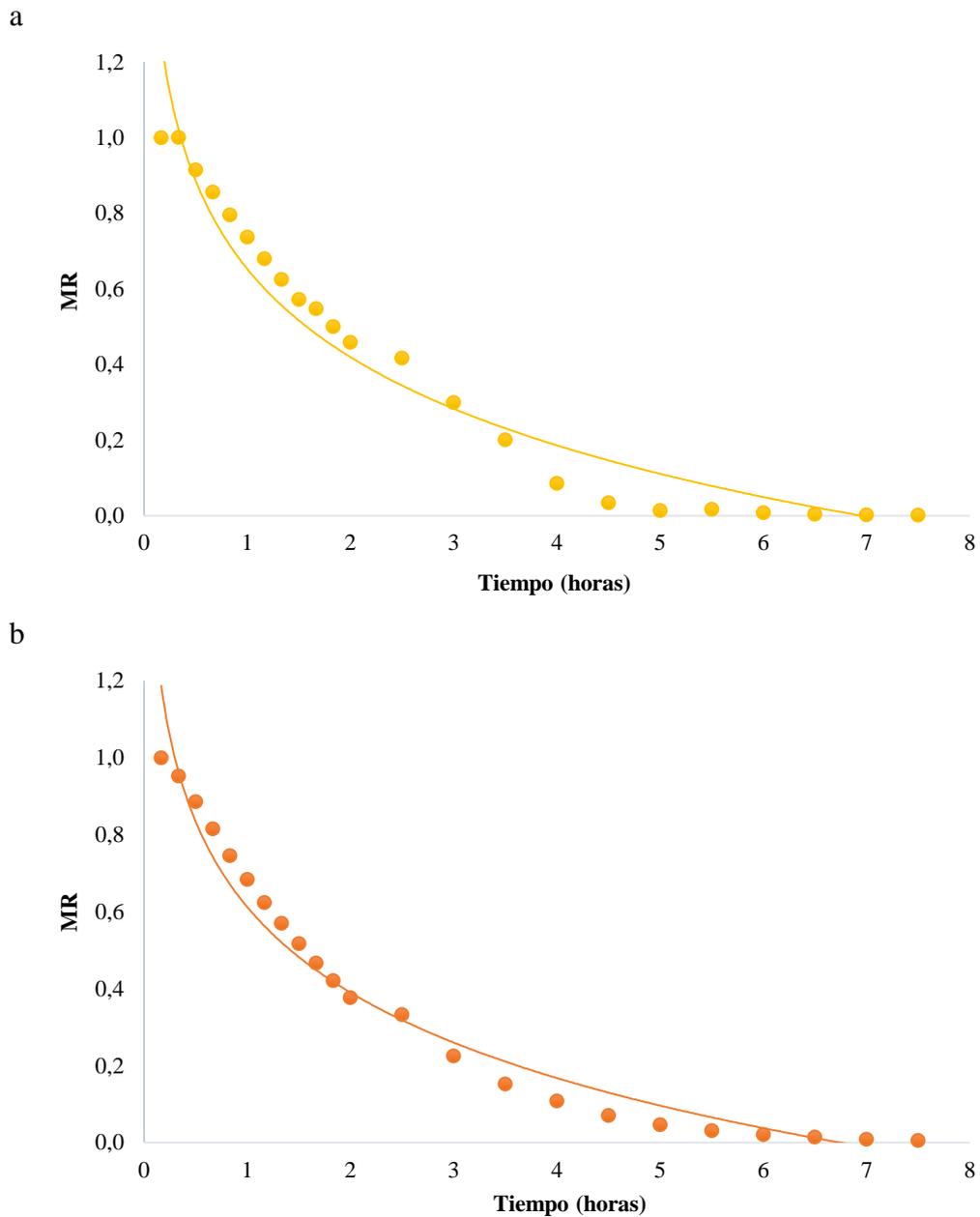


Figura 9. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Logarítmico
a. Oca amarilla, b. Oca roja

Originalmente el modelo de Thomson se desarrolló con la finalidad de simular el secado de maíz, debido a que podía predecir el secado en la última capa del grano con ayuda de balances previos y posteriores al secado; por ello es considerado como un modelo de tipo semi-empírico debido a que permite integrar variables (Parra Coronado, Roa Mejía, Oliveros Tascón, & Sanz Uribe, 2017). La Figura 10 muestra el modelado matemático de Thomson para las dos muestras analizadas.

La constante a arrojó valores de 0,35 y 0,03 para Oca amarilla y roja, respectivamente. Mientras que la constante b presentó valores de 0,35 y 0,03, respectivamente. Al revisar bibliografía relacionada, se observó que en el estudio de la cinética de secado de cáscara de aguacate, a 60°C y una velocidad de secado de 1,6 m/s, se registraron valores de a de 44,01 y b de 4,12; mientras que para una velocidad de 0,8 m/s se obtuvieron valores de 50,92 y 4,54, respectivamente. Al realizar una comparación, se observó una diferencia considerable con los valores del presente estudio, debida a las diferencias entre la composición de las dos materias primas (Razola Díaz, Guerra Hernández, Gómez-Caravaca, García Villanova, & Verardo, 2023).

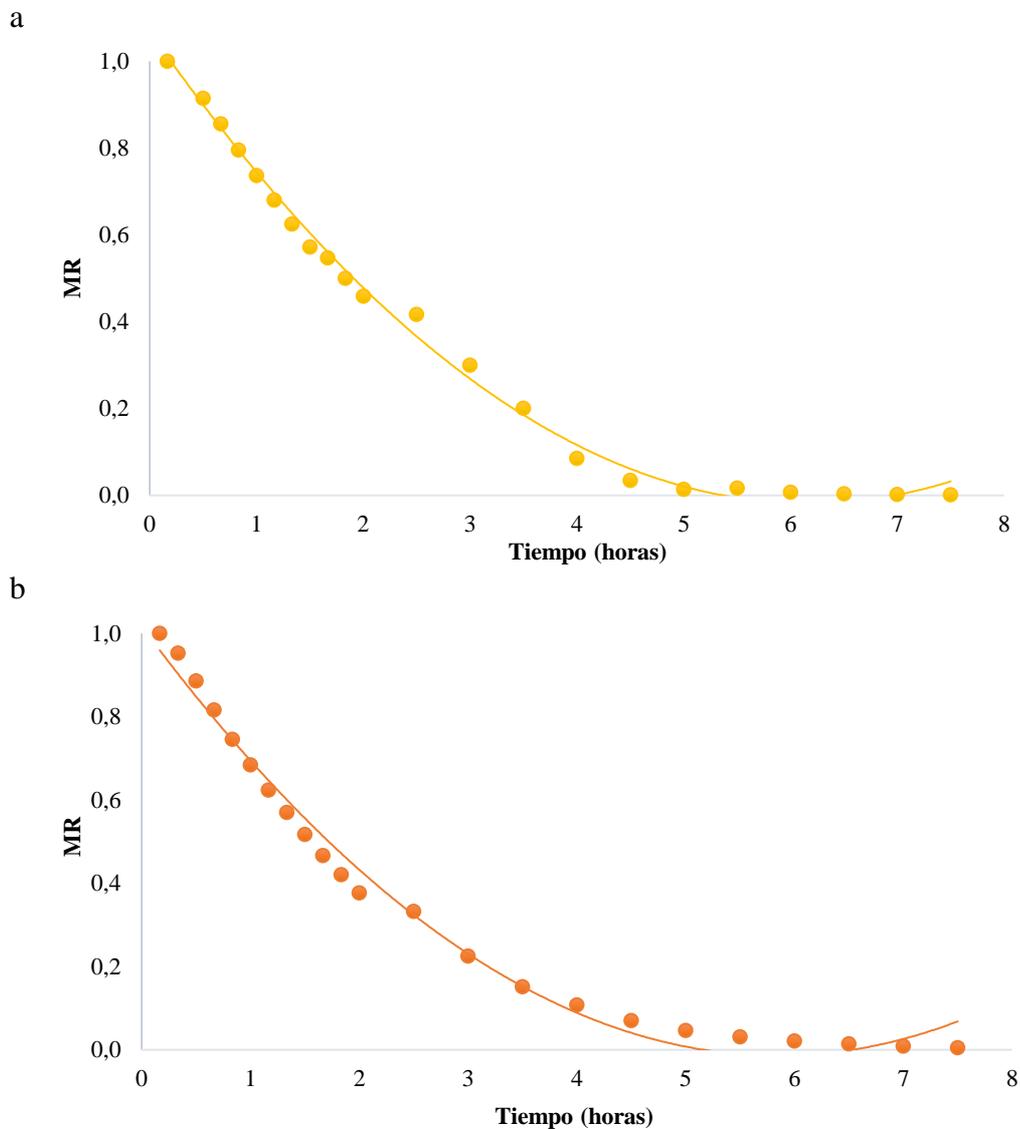


Figura 10. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Thomson
a. Oca amarilla, b. Oca roja

Finalmente, el modelo matemático de Fick (Figura 11) presentó un factor de difusión de $2,79 \times 10^{-7} m^2/s$ para la Oca amarilla y $2,23 \times 10^{-7} m^2/s$ para la Oca roja. En el estudio de los parámetros de la cinética de secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*) se registraron valores de 4×10^{-5} , $5,3 \times 10^{-5}$ y $7,4 \times 10^{-5} m^2/s$ a temperaturas de 50, 65 y 80°C, respectivamente; esto evidencia una notable relación entre el coeficiente de difusión y la temperatura (Castro Arata, Otero Nole, & Llamoca Domínguez, 2021).

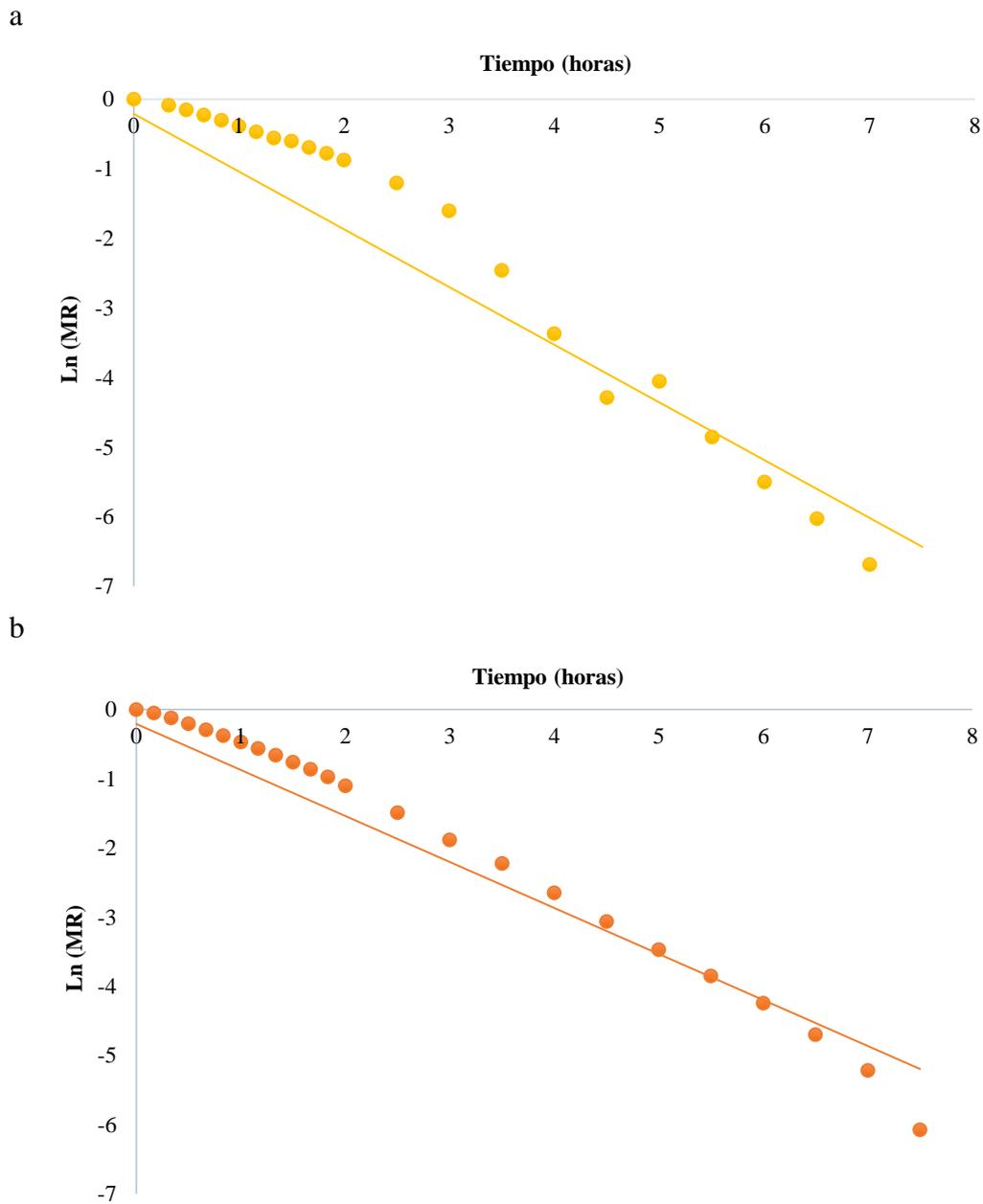


Figura 11. Ajuste de los datos de cinética de secado al modelo de Fick
a. Oca amarilla, b. Oca roja

En la Tabla 5 se presentan las ecuaciones determinadas para cada modelo analizado. Tomando como referencia el coeficiente de determinación (R^2), se puede notar que para la Oca amarilla el modelo que mejor se ajusta es el de Thompson; de forma contraria el modelo que ofrecen un menor ajuste es el de Henderson y Pabis. No obstante, es importante también tomar en cuenta el error cuadrático medio (SE), debido a que mientras menor sea su valor, significa que el ajuste es mejor (Morata-Ramírez, Holgado-Tello, Barbero-García, & Mendez, 2015). Tomando en cuenta este parámetro, el modelo con mejor coeficiente de determinación y error cuadrático medio, para la Oca amarilla, es el de Newton.

Mientras que para la Oca roja, el modelo que mejor se ajusta según el coeficiente de determinación es el de Page modificado; sin embargo, considerando el error cuadrático medio, el mejor modelo es el de Newton.

Resultados similares observaron en un estudio realizado durante el secado de Oca (*Oxalis tuberosa*) en un secador discontinuo, en el que el modelo de Newton arrojó valores del coeficiente de determinación de 0,9231, 0,9429, 0,9312 y 0,9206, para temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C, respectivamente. No obstante, en este estudio, el modelo de Midilli fue el que presentó un mejor ajuste de manera general (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019).

Finalmente, se analizó el desvío medio relativo (P), también conocido como error medio relativo, factor que se caracteriza por comparar la incertidumbre que se puede presentar entre las mediciones (Zapata Rivera & Peña Varón, 2020). En la Oca amarilla se observó un valor mayor en el modelo de Page (18,9); mientras que el menor valor fue observado en el modelo Logarítmico (0,4221). En el caso de la Oca roja los datos registrados fueron de 17,2519 y 0,4327 para los modelos de Page y Logarítmico, respectivamente.

Tabla 5. Modelos matemáticos aplicados en la cinética de secado de la Oca amarilla y Oca roja

Muestra	Modelo	Ecuación	r^2	SE	P
Oca amarilla	Newton	$MR = Exp^{(-1,0196 \times t)}$	0,9727	3,1287	1,2003
	Page	$MR = Exp^{(-0,3816 \times t^{1,4601})}$	0,9921	20,3760	18,9007
	Page modificado	$MR = Exp^{[(-1,5997 \times t)^{1,2908}]}$	0,976	5,2164	2,6844
	Henderson y Pabis	$MR = 2,139 \times Exp^{(-0,922 \times t)}$	0,8881	23,1519	30,1504
	Logarítmico	$MR = (1,158 \times e^{(-0,444 \times t)}) + 0,082$	0,9464	1,2859	0,4221
	Thomson	$MR = 1,0684 - 0,3523 \times t + 0,0285 \times t^2$	0,9953	11,6696	16,4508
	Fick	$MR = \frac{8}{\pi^2} \times Exp\left(-\frac{\pi^2 \times 2,7812 \times 10^{-7}}{4 \times 0,002^2} \times t\right)$	0,9727	4,0237	5,7033
Oca roja	Newton	$MR = Exp^{(-0,7743 \times t)}$	0,9905	0,1274	0,2262
	Page	$MR = Exp^{(-0,4692 \times t^{1,243})}$	0,9981	7,4486	17,2519
	Page modificado	$MR = Exp^{[(-1,8380 \times t)^{1,243}]}$	0,9997	4,7650	11,9266
	Henderson y Pabis	$MR = 1,4396 \times Exp^{(-0,7 \times t)}$	0,9822	3,7801	12,3761
	Logarítmico	$MR = (1,089 \times e^{(-0,527 \times t)}) + 0,038$	0,9685	0,5553	0,4327
	Thomson	$MR = 1,0168 - 0,3525 \times t + 0,0301 \times t^2$	0,9893	3,1506	10,9727
	Fick	$MR = \frac{8}{\pi^2} \times Exp\left(-\frac{\pi^2 \times 2,2283 \times 10^{-7}}{4 \times 0,002^2} \times t\right)$	0,9905	1,9936	6,5661

Elaborado por: Baquerizo (2023).

En la Tabla 6 se resumen las constantes empíricas presentadas en los modelos matemáticos analizados.

La constante k indica la proporcionalidad entre la humedad y el tiempo de secado, y puede definirse como la función de humedad presente en algún determinado tipo de material. Se observa un valor superior en la Oca amarilla en el modelo de Page modificado (1,5997) y su valor más bajo en el modelo de Page con 0,3816. En el caso de la Oca roja ocurre de igual forma con un valor máximo de 1,8380 en el modelo de Page modificado y un valor de 0,4692 en el modelo de Page.

Un estudio de secado de hojas de muña (*Minthostachys mollis*), evidencia valores más altos en el análisis de esta constante (51,380 y 2,618 para Page y Page modificado respectivamente) (Silva, Mateo, Eccoña, & Della, 2022). Esta diferencia se encuentra evidente, debido a la diferencia entre ambas matrices alimenticias comparadas.

Mientras que la constante n se relaciona con la resistencia del interior del alimento al proceso de secado (Castro Arata et al., 2021). Los modelos que presentan la constante n son los de Page y Page modificado en estos casos los datos no tienen diferencias evidentes.

Finalmente, las constantes a , b y c son netamente empíricas y dependen de cada modelo (Collazo-Abreu, Morejón-Mesa, Fernández-Chuairey, & Vázquez-Alfonso, 2018). La constante a presenta un valor de 2,1390 para el modelo de Henderson y Pabis y un valor de 0,3523 para Thomson en la Oca amarilla; mientras que en la Oca roja se determinaron valores de 1,4396 y 0,3525, respectivamente.

Tabla 6. Resumen de las constantes obtenidas en el modelamiento de la cinética de secado

Parámetro	Muestra	Newton	Page	Page M.	Henderson y Pabis	Logarítmico	Thomson	Fick
n	Oca amarilla	-	1,4601	1,2908	-	-	-	-
	Oca roja	-	1,2430	1,2430	-	-	-	-
k	Oca amarilla	0,8689	0,3816	1,5997	0,9220	0,444	-	-
	Oca roja	0,7743	0,4692	1,8380	0,7000	0,527	-	-
a	Oca amarilla	-	-	-	2,1390	1,158	0,3523	-
	Oca roja	-	-	-	1,4396	1,089	0,3525	-
b	Oca amarilla	-	-	-	-	-	0,0285	-
	Oca roja	-	-	-	-	-	0,0301	-
c	Oca amarilla	-	-	-	-	0,082	-	-
	Oca roja	-	-	-	-	0,038	-	-
D _{eff}	Oca amarilla	-	-	-	-	-	-	2,7851×10 ⁻⁷
	Oca roja	-	-	-	-	-	-	2,2283×10 ⁻⁷

Elaborado por: Baquerizo (2023)

3.1.4. Curva de la velocidad de secado

Las Figuras 12 y 13 muestran las curvas de velocidad de secado de la Oca amarilla y roja, respectivamente.

En el caso de la Oca amarilla no se evidencian la fase de adaptación (A-B), esto puede deberse al diámetro mínimo que las rodajas presentan ($26\pm 0,9$ mm), debido a que a menor área de contacto alimento-aire, más rápido alcanza el interfaz la temperatura de secado. Además, existe evidencia científica de que la duración de esta fase está en función del contenido inicial de humedad del sólido, de su temperatura y de la velocidad del aire (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019).

Al analizar los valores de humedad inicial de los dos tubérculos evaluados, se evidencia una diferencia considerable (Oca amarilla: $62,4732\pm 1$ kg agua/kg sólido seco; Oca roja: $57,92\pm 5,29$ kg agua/kg sólido seco), esto puede marcar la ausencia y presencia de la zona A-B que evidencias ambas muestras, respectivamente. Sin embargo, es importante aclarar que con fines de cálculo se suele prescindir de los valores que se desarrollan en esta fase, debido a que se considera que el alimento en este periodo de tiempo aún no alcanza el régimen estacionario.

La zona B-C en la Oca amarilla presenta una velocidad de pérdida de agua promedio de 1247 ± 66 kg agua/h \times m²; el valor de la desviación estándar evidencia que en este periodo la velocidad de secado permanece prácticamente constante. En esta fase se evidencia que la humedad libre del alimento se evapora y que la temperatura de la interfaz se mantiene constante.

Al finalizar la zona B-C se encuentra la humedad crítica, que en este tubérculo arrojó un valor de $4,22$ kg agua/kg sólido seco. Esta propiedad indica que el material ha liberado la totalidad del agua libre disponible y que por ende está cerca de alcanzar la humedad de equilibrio (Mesinas, Pintor, Becerra, & Sobrevilla, 2020).

Posteriormente se observó la fase C-D, que presenta una caída de la velocidad de secado de 1166 hasta 382 kg agua/h \times m². De manera general esta zona comienza cuando se ha perdido la mayor cantidad de agua (Lucira Anticona, 2020).

Y finalmente se observa la fase D-E. El punto D es conocido comúnmente como el segundo punto crítico, debido a que en este punto el agua que contenía la superficie del alimento se ha evaporado por completo (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019). En el caso de la Oca amarilla el punto E se logró con una humedad de 0,0598 kg agua/kg sólido seco.

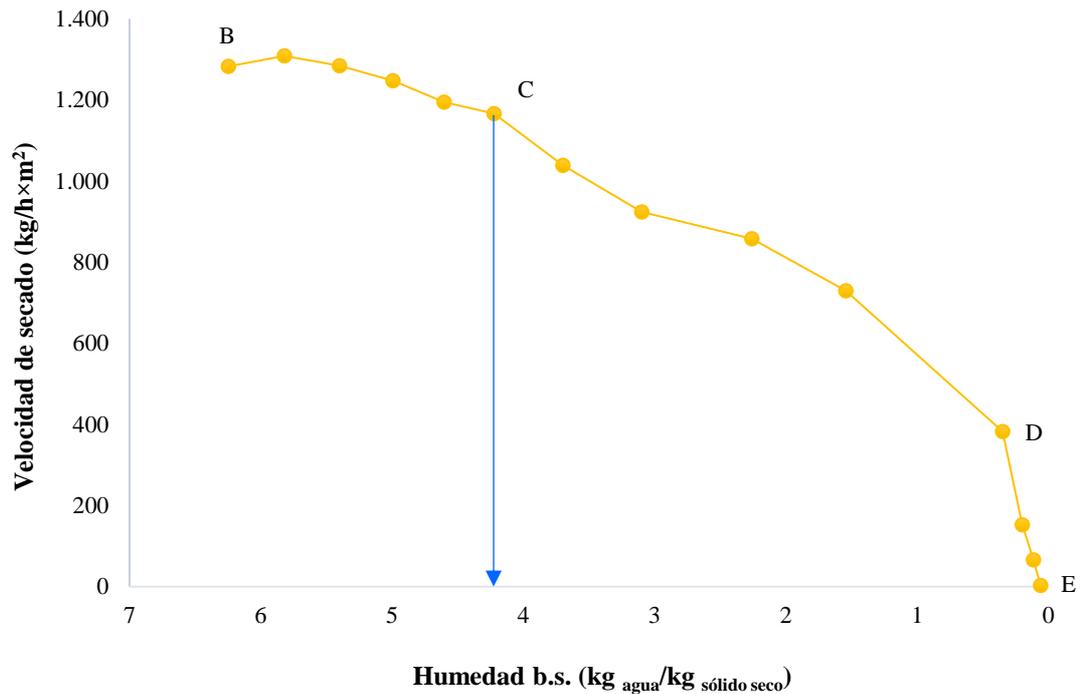


Figura 12. Curva de velocidad de secado de la Oca amarilla

En el caso de la Oca roja se observa la zona A-B claramente (Figura 13). Al finalizar la zona B-C se determinó una humedad crítica de 1,92 kg agua/kg sólido seco. Y finalmente se observó la fase D-E, conocida como la segunda fase de reducción de la velocidad de secado (Carhuallanqui Palian & Zapata Huarcaya, 2019). Al finalizar esta fase se observa el punto E, que en el caso de la Oca roja arrojó un valor de humedad de 0,0858 kg agua/kg sólido seco; es evidente que la humedad tiende a cero, lo que significa que existe un equilibrio entre el material y el ambiente.

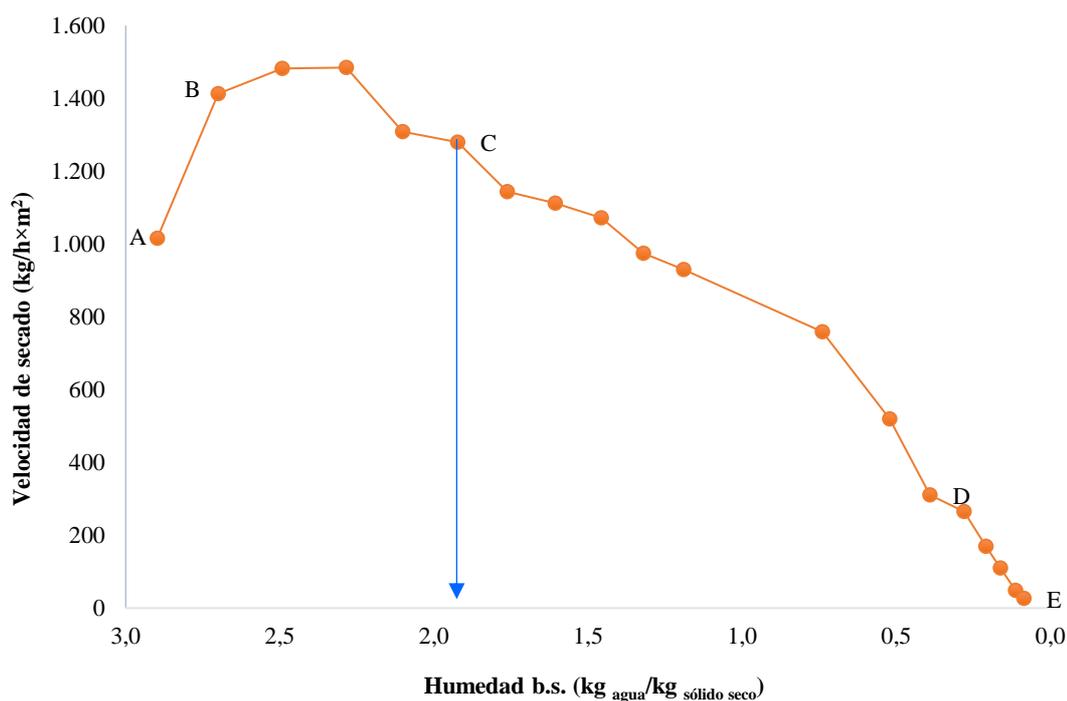


Figura 13. Curva de velocidad de secado de la Oca roja

3.1.5. Isotermas de adsorción

Las Figuras 14 y 15 muestran las isotermas de adsorción de la Oca amarilla y roja, respectivamente. Ambas presentan una forma del tipo II, características de los productos alimenticios. Un comportamiento similar presentó pulpa de banana verde (Ponce, Hanz, & de Moraes, 2021) y harina de camote (Saavedra, 2022).

Las isotermas comúnmente evidencian 3 zonas: zona A que comprende desde una a_w de 0 hasta 0,2, y se caracteriza por ser la región donde la monocapa adsorbe agua. La zona B comprende desde una a_w de 0,2 hasta 0,7, en esta zona se observa la adsorción de agua de las multicapas. Y finalmente la zona C corresponde a a_w mayor a 0,7, y se caracteriza por ser el punto donde el agua se condensa en la porosidad del alimento.

En la Oca amarilla y roja la zona A es débilmente observada, debido a que la sal con menor actividad de agua permitió obtener un ambiente con una humedad relativa de 11,78%. La zona B se observó entre los valores de a_w de 0,11 y 0,35, y formó una curva cóncava que representa como se adhiere el agua a la superficie del alimento (Contreras et al., 2003; Cuesta Zúñiga & Nieto Burbano, 2022).

Sin embargo, entre valores de a_w de 0,35 y 0,80, se observó un cambio de tendencia. En esta zona existe una mayor inclinación en ambas matrices, lo que puede ser consecuencia de que al aumentarse la humedad relativa del ambiente, mayor cantidad de agua absorben los sitios activos de la harina. Además, esto evidencia que la harina de Oca es altamente higroscópica, debido a su composición y estructura, lo cual favorece a la absorción de agua (Shih, Daigle, & Champagne, 2011).

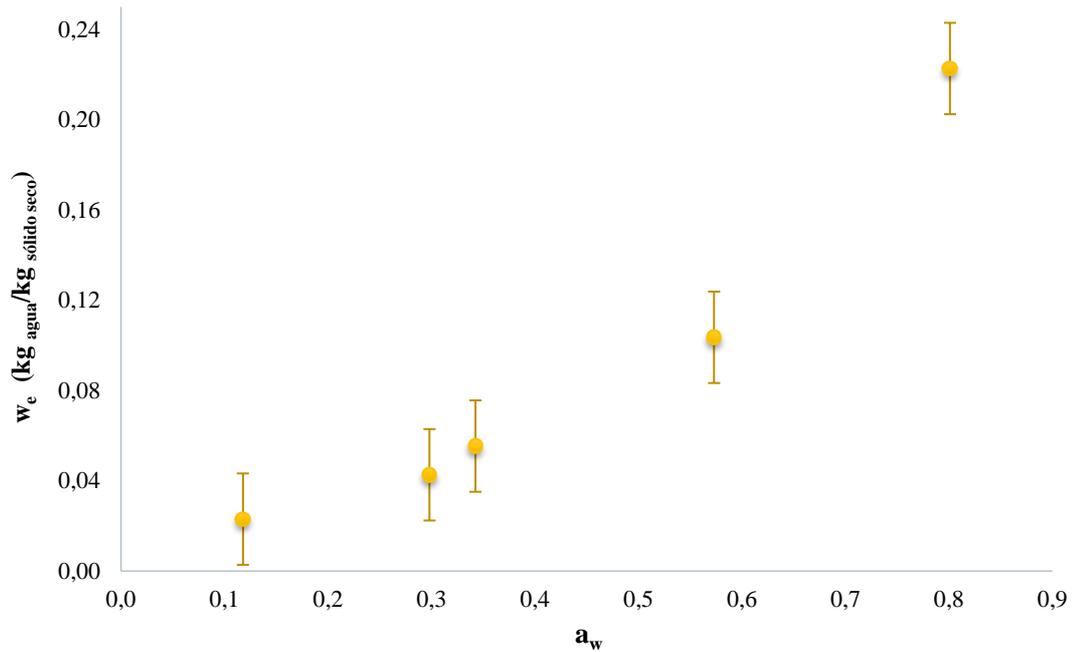


Figura 14. Isoterma de adsorción de la Oca amarilla

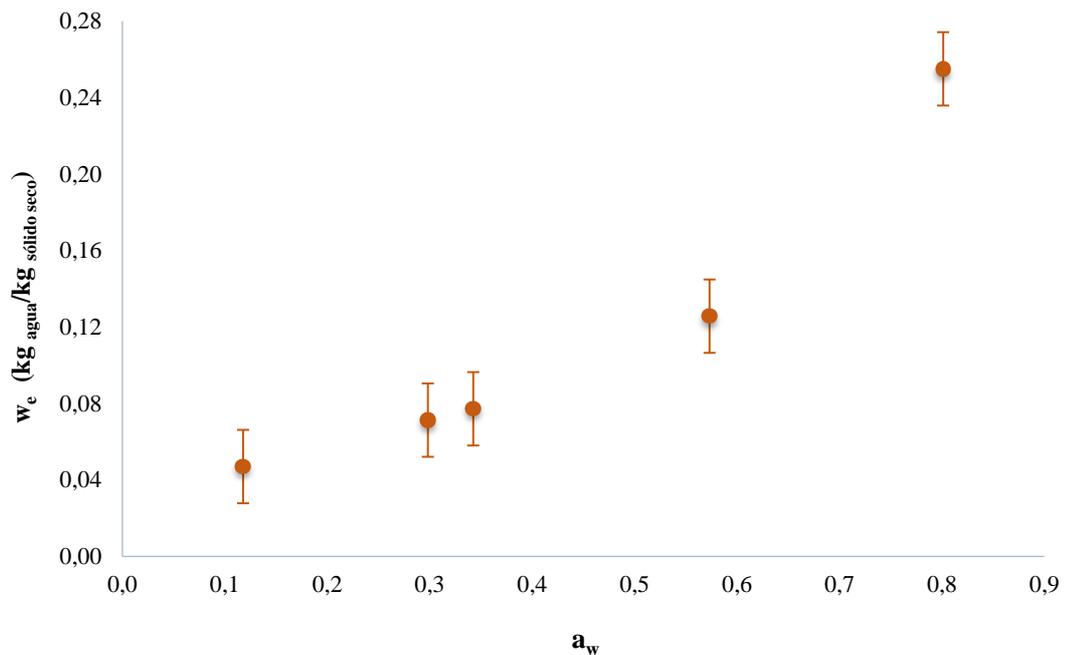


Figura 15. Isoterma de adsorción de la Oca roja

En la Figura 16 se observa la comparación de las isothermas de adsorción de las dos muestras estudiadas. Aunque ambas tienen una tendencia similar, la curva de la Oca amarilla aparece por debajo de la Oca roja. Al analizar la humedad de las harinas al inicio del experimento, se observa que la harina de Oca amarilla presenta un valor inferior ($4,35 \pm 0,49$ kg agua/kg sólido seco), frente a la harina de Oca roja ($5,01 \pm 0,52$ kg agua/kg sólido seco), y esto puede explicar la tendencia observada.

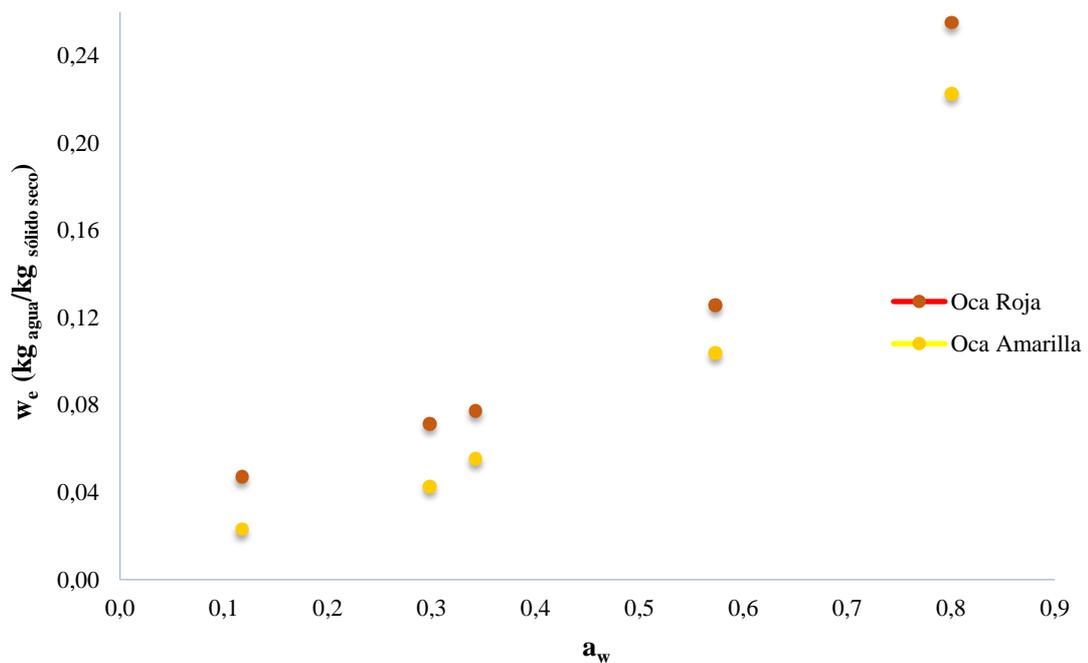


Figura 16. Comparación de las isothermas de adsorción de Oca amarilla y Oca roja

Los datos obtenidos en el estudio de las isothermas de adsorción de agua se ajustaron a los modelos matemáticos de BET y GAB.

La Tabla 7 muestra los valores obtenidos con el modelo matemático de BET. Este modelo permitió realizar un ajuste correcto hasta un valor máximo de actividad de agua de 0,57. La Oca roja evidenció una mejor correlación de variables de acuerdo con el factor de determinación ($r^2 = 0,996$); sin embargo, la Oca amarilla también muestra un ajuste considerable con un valor de 0,979. Este modelo ha mostrado un ajuste perfecto en alimentos como harina sin malterar de quinua blanca, negra y roja (secada a 55°C), con coeficientes de determinación de 0,998, 0,979 y 0,994, respectivamente. Estos datos evidenciaron ausencia de variabilidad en el ajuste entre las especies pertenecientes a la misma familia (Alvarado Yupanqui, Miano, & Barraza, 2020).

Un estudio de deshidratación de zanahoria blanca, evidenció un ajuste similar con los datos obtenidos en cámaras herméticas mantenidas a 20°C; sin embargo, se observó que el aumento de la temperatura de las cámaras a 30°C, redujo considerablemente el coeficiente de determinación (de 0,92 a 0,61) (D. B. Ramírez, 2021).

En este modelo la constante C evidencia el calor que se desprende del proceso de absorción. La oca amarilla registra un valor de 4,44, mientras que la Oca roja registra un valor de 21,98. Hay evidencia científica que relaciona directamente el aumento del valor de esta constante con el aumento de la temperatura. Por ejemplo, un estudio realizado en harina de maíz nixtamalizada a 24°C arrojó un valor 7,87 y a 35°C un valor de 8,10 (M. M. Ramírez, Cruz, Vizcarra, & Anaya, 2014). En otra investigación realizada en harina de yuca se determinaron valores de 38,39, 73, 98,33 y 100,45 para temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C y 35°C, respectivamente (Aponte Ayala, 2011).

Mientras que la constante w_0 presenta valores de 0,05 y de 0,06 para la Oca amarilla y roja, respectivamente. Este valor hace referencia a la humedad de la monocapa y su valor contribuye a la descripción del comportamiento de la harina en las fases de distribución y/o almacenamiento.

La monocapa en un alimento oscila entre actividades de agua de 0,2 a 0,3, debido a que esta es la región donde el producto tiene la vida en anaquel al máximo, y es precisamente el modelo BET el más utilizado para la determinación de la humedad en la monocapa en alimentos (M. M. Ramírez et al., 2014).

La constante de humedad en la monocapa (w_0) en harina de arveja blanca criolla, secada a tres diferentes temperaturas: 25°C, 30°C y 35°C, presentó valores de 0,0514, 0,0416 y 0,0464, respectivamente. Este estudio evidencia que la temperatura de procesamiento no influye considerablemente en los valores de esta constante (Caruajulca Vargas, 2019).

El modelo matemático BET posee limitaciones debido a que solo ajusta isotermas entre un intervalo de a_w de 0 a 0,55, razón por la que existen otros modelos que sirven para determinar isotermas en intervalos más grandes, como es el caso del modelo de GAB (Alvarado Yupanqui et al., 2020).

Tabla 7. Constantes obtenidas con el modelo de BET para la Oca amarilla y roja

Alimento	Sales	a_w	w_e	$\frac{a_w}{(1 - a_w) \times w_e}$	C	w_o	r^2
Oca amarilla	LiCl	0,1178	0,0230	5,8061	4,4432	0,0507	0,9787
	CH ₃ CO ₂ K	0,2982	0,0427	9,9614			
	MgCl ₂	0,3425	0,0554	9,4056			
	NaBr	0,5732	0,1036	12,9675			
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,8012	0,2227	18,0991			
Oca roja	LiCl	0,1178	0,0470	2,8396	21,9775	0,0554	0,9958
	CH ₃ CO ₂ K	0,2982	0,0713	5,9576			
	MgCl ₂	0,3425	0,0772	6,7449			
	NaBr	0,5732	0,1257	10,6853			
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,8012	0,2551	15,8014			

w_o = Humedad de la capa monomolecular; C = Constante del material relacionado con el calor desprendido

La Tabla 8 muestra las constantes obtenidas con el modelo de GAB. Este modelo permitió realizar un ajuste correcto en todo el intervalo de actividad de agua evaluado. La Oca roja evidenció una mejor correlación de variables de acuerdo con el factor de determinación ($r^2 = 0,998$); mientras que la Oca amarilla presentó un valor de 0,904.

La constante C representa el calor de adsorción de la monocapa. En la Oca amarilla arrojó un valor de 16,77 y en la Oca roja 16,27. Se han observado valores menores en muestras con alta cantidad proteica, debido a que estas estructuras requieren menor cantidad de energía para absorber agua (Deusa, 2019). Por otro lado, esta constante está relacionada con la temperatura de análisis. Por ejemplo, en un estudio realizado en harina de papa andina, se determinó que el valor incrementó de 613 a 15°C hasta 13834 a 25°C (Sierra Puga & Allca Ayala, 2022). Sin embargo, otros estudios han reportado ausencia de relación con la temperatura; uno de estos estudios fue realizado en harina de camote, en donde la constante C varió sin una tendencia clara a 20, 30 y 40°C (55,09, 49,2 y 195,2, respetivamente) (Saavedra, 2022).

Por otro lado, la constante k se puede definir como la relación entre el agua de las multicapas del alimento con el factor adsorbente. Se considera que un valor cercano a la unidad indica presencia de agua en las multicapas (M. M. Ramírez et al., 2014). Para la Oca amarilla el valor de k fue de 0,999 y para la Oca roja de 0,975. Estos valores indican una mayor capacidad de la harina de la Oca amarilla a absorber agua en ambientes de humedad relativa alta.

Finalmente, la humedad en la monocapa (w_0) fue de 0,048 para la Oca amarilla y 0,057 para la Oca roja. Estos valores son similares a los obtenidos en harina de castaña (0,032) (Arocutipa & Delgado Solis, 2021) y pulpa de banana verde (0,114) (Ponce et al., 2021). Considerando que el modelo de GAB es comúnmente asimilado como una extensión del modelo de BET (García, 2015; Kiranoudis, et al., 1993), se observa que los valores de w_0 en ambos modelos son similares.

Un estudio realizado en harina de papa evidenció que el tipo de pre-tratamiento influye considerablemente en esta constante, debido a que arrojó valores diferentes en la muestra no tratada (0,059), frente a la harina hidrolizada con alfa-amilasa (0,088) y la hidrolizada con ácido clorhídrico (0,098) (P. F. A. García, 2021).

Tabla 8. Constantes obtenidas con el modelo de GAB para la Oca amarilla y Oca roja

Alimento	Sales	a_w	w_e	$\frac{a_w}{w_e}$	C	k	w_o	r^2
Oca amarilla	LiCl	0,1178	0,0230	5,1222	16,7690	0,9997	0,0480	0,904
	CH ₃ CO ₂ K	0,2982	0,0427	6,9909				
	MgCl ₂	0,3425	0,0554	6,1842				
	NaBr	0,5732	0,1036	5,5345				
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,8012	0,2227	2,5981				
Oca roja	LiCl	0,1178	0,0470	2,5051	16,2720	0,9748	0,0569	0,9984
	CH ₃ CO ₂ K	0,2982	0,0713	4,1810				
	MgCl ₂	0,3425	0,0772	4,4348				
	NaBr	0,5732	0,1257	4,5605				
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,8012	0,2551	3,1413				

a_w = Actividad de agua; w_e = Humedad en equilibrio; w_o = Humedad del material en el punto de de adsorción; **C** = calor de adsorción de la monocapa; **K** = Factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. 1. Conclusiones

- En el caso de la Oca amarilla no se evidenció la fase de adaptación (A-B) en la curva de velocidad de secado. Esto puede deberse al diámetro mínimo que las rodajas presentan y al contenido inicial de humedad. La zona B-C en ambas matrices evidenció una velocidad prácticamente constante de pérdida de agua. En esta fase se evidencia que la humedad libre del alimento se evapora y que la temperatura de la interfaz se mantiene constante. La humedad crítica de la Oca amarilla arrojó un valor de 4,22 kg agua/kg sólido seco y 1,92 kg agua/kg sólido seco en la Oca roja.
- El modelo matemático que mejor se ajustó a los datos de la cinética de secado de la Oca amarilla, considerando el coeficiente de determinación (r^2) fue el de Thompson. No obstante, considerando el error cuadrático medio (SE), el modelo con mejor ajuste fue el de Newton. Mientras que para la Oca roja, el modelo que mejor se ajustó según el coeficiente de determinación fue el de Page modificado; sin embargo, considerando el error cuadrático medio, el mejor modelo fue el de Newton.
- Las isothermas de adsorción presentaron una tendencia de tipo II, características de los productos alimenticios. Las isothermas comúnmente evidencian 3 zonas; sin embargo, en la Oca amarilla y roja la zona A fue débilmente observada. La zona B se observó entre los valores de a_w de 0,11 y 0,35, y formó una curva cóncava que representa la adsorción de agua a la superficie del alimento. Y la zona C mostró un cambio de tendencia, lo que indica una mayor cantidad de agua absorbida por parte de la matriz alimenticia.

- Los modelos matemáticos BET y GAB se ajustaron de manera satisfactoria en ambas matrices; no obstante, el modelo GAB, al tener un mayor rango de alcance, se ajustó con un valor más elevado en el coeficiente de determinación. Se puede destacar que tanto el modelo BET como el de GAB se fundamentan en el mismo principio; sin embargo, el modelo de GAB introduce una constante extra, la constante K, que evalúa las interacciones entre las moléculas de las multicapas y a su vez produce un modelo más versátil.

4. 2. Recomendaciones

- Para la construcción de las isothermas de sorción se recomienda trabajar con más sales con el objetivo de que se puedan evidenciar claramente las tres zonas características.
- Además se sugiere evaluar las isothermas de sorción a diferentes temperaturas, con la finalidad de comparar los parámetros obtenidos.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias bibliográficas

- Abano, E. E., Akanson, J., & Kizzie-Hayford, N. (2021). Drying kinetics and quality of whole, halved, and pulverized tiger nut tubers (*Cyperus esculentus*). *International Journal of Food Science*, 2021.
- 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*. (Licenciatura en Ingeniería Química), Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija, Bolivia.
- Albuja Illescas, L. M., Basantes Vizcaíno, T. F., & Aragón Suárez, J. P. (2020). Análisis económico de cultivos andinos presentes en las provincias de Imbabura y Carchi–Ecuador. *Revista Argentina de Economía Agraria*, 21, 43-60.
- Altay, K., Hayaloglu, A. A., & Dirim, S. N. (2019). Determination of the drying kinetics and energy efficiency of purple basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves using different drying methods. *Heat and Mass Transfer*, 55, 2173-2184.
- Alvarado, J. d. D., & Aguilera, J. M. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*.
- Alvarado Yupanqui, L., Miano, A. C., & Barraza, J. G. (2020). *Sorption isotherm and shelf life of malted quinoa flour*. Paper presented at the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.
- Aponte Ayala, A. (2011). Estimación de las isothermas de adsorción de calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología en el Sector agropecuario y agroindustrial*, 9, 88-96.
- Arocutipa, C. D., & Delgado Solis, C. (2021). *Evaluación de las isothermas de adsorción de la harina de torta de castaña (Bertholletia excelsa, HBK)*.

- Bécquer Frauberth, C. L., Leonardo Ederson, P. C., Torres, E. T., Massipe Hernández, J. R., & Quispe Flores, M. (2020). Velocidad de secado en tres tipos de secadores solares del Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*). *Revista chilena de ingeniería*, 28, 248-254.
- Caiza Mañay, D. R. (2021). *Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y ecuaciones de ajuste: una revisión bibliográfica de datos publicados*. (Ingeniero en alimentos), Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Carhuallanqui Palian, L., & Zapata Huarcaya, L. A. (2019). *Proceso de secado de la oca (oxalis tuberosa) en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional del Callao, Callao - Perú.
- Cartagena Gordillo, Y. (2022). *Isotermas de adsorción, capacidad antioxidante y color de la harina de dos variedades de papa nativa (Solanum tuberosum)*. (Máster en Ciencia y Tecnología de Alimentos), Universidad Nacional de San Antonio Abad, Cusco - Perú.
- Caruajulca Vargas, L. E. (2019). *Vida útil de harina de tres variedades de arveja (Pisum Sativum L.) a tres tiempos diferentes de tostado*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca - Perú.
- Castro Arata, D. H., Otero Nole, K., & Llamoca Domínguez, E. (2021). Estudio de los parámetros cinéticos en el secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*). *Revista de Innovación y Transferencia Productiva*, 2.
- 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. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 1-10.
- 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, 159-174.

- Collazo-Abreu, P. L., Morejón-Mesa, Y., Fernández-Chuairey, L., & Vázquez-Alfonso, Y. (2018). Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27, 89-98.
- Contreras, M., Escolano, O., Rodríguez, V., Díaz, F., Pérez, R., García, S., & García, F. (2003). Estudio de adsorción de fenantreno en diferentes tipos de arcillas. In *Informes técnicos Ciemat. Editorial Ciemat. Pag* (pp. 81-90.2003).
- Cuesta Zúñiga, E. E., & Nieto Burbano, A. S. (2022). *Evaluación de la capacidad de adsorción de arcillas naturales mediante cinética e isothermas de adsorción en la remoción de colorantes*. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba - Ecuador.
- Deusa, A. J. (2019). *Obtención de las isothermas de sorción de pollo a temperaturas de congelación*. Universitat Politècnica de València,
- Eguren, F. (2018). La agricultura en los países Andinos: Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela: Una revisión de largo plazo 1961-2014. *La Revista Agraria*, 4-10.
- Espín, S., Villacrés, E., & Brito Grandes, B. (2004). Caracterización físico-química, nutricional y funcional de raíces y tubérculos andinos. In V. Barrera, C. Tapia, & A. Monteros (Eds.), *Raíces y tubérculos Andinos: Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador*. Quito - Ecuador: Intituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Espinosa, P., Vaca, R., Abad, J., & Crissman, C. C. (1997). *Raíces y tubérculos andinos cultivos marginados en el Ecuador: situación actual y limitaciones para la producción*: International Potato Center.
- FAO. (2018). El desperdicio de comida, una oportunidad para acabar con el hambre. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2018/10/1443382#:~:text=En%20total%2C%20seg%20cifras%20del,%20procesado%20distribuci%C3%B3n%20y%20consumo.>

- Garcés Hernández, B. F. (2019). *Obtención de harina de mashua (Tropaeolum Tuberosum) y oca (Oxalis Tuberosa) mediante deshidratación para la elaboración de pastas artesanales*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador.
- García, C. S. (2015). *Determinación de la higroscopicidad y comportamiento termodinámico de la madera juvenil y madura a través de sus isotermas de sorción*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España.
- García, P. F. A. (2021). *Efecto de la temperatura en el valor de monocapa de harina de Tocosha de papa (Solanum tuberosum) mediante la isoterma de GAB*. Universidad Nacional de Trujillo, Huamachuco - Perú.
- Gómez, M. (2009). *Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León - México.
- González, A., Espinoza, A., Cañizares, A., & Méndez, J. (2008). Obtención de un polvo de ají dulce (*Capsicum chinense*) producido mediante deshidratación por aire forzado. *Revista científica UDO agrícola*, 8, 118-126.
- 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, Riobamba - Ecuador.
- Guevara, A. (2021). El rol de los bancos de alimentos en países en desarrollo. *Ecuador es calidad - Revista Científica Ecuatoriana*, 8.
- Hanco, Z. J. M., & Mamani, O. P. N. (2017). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de oca (*Oxalis tuberosa* Mol) en el proceso de deshidratación a bajas temperaturas asistido por ultrasonido.
- Hidalgo, J., & Martín, J. (2020). El desperdicio de alimentos, un problema global. In *IndustriaAmbiente: gestión medioambiental y energética* (Vol. 29, pp. 28-33).
- Hossain, M. A., Dey, P., & Joy, R. I. (2021). Effect of osmotic pretreatment and drying temperature on drying kinetics, antioxidant activity, and overall quality of

taikor (*Garcinia pedunculata* Roxb.) slices. *Saudi journal of biological sciences*, 28(12), 7269-7280.

INIAP. (2023). Leguminosas y granos andinos. Recuperado de <https://www.iniap.gob.ec/leguminosas-y-granos-andinos/#>

Iza Arias, L. A. (2022). *La producción agrícola andina y el uso de suelos agrícolas en la región sierra del Ecuador. Un estudio de clusters del maíz, la papa y la quinua.*

Jiménez-Esparza, L. O. (2019). La agricultura andina y su problemática. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 7, 1-2.

Kiranoudis, C., Maroulis, Z., Tsami, E., & Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food engineering*, 20(1), 55-74.

León Marróu, M. E., Villacorta González, M. Y., & Pagador Flores, S. E. (2011). Composición química de oca (*Oxalis tuberosa*), arracacha (*Arracaccia xanthorrhiza*) y tarwi (*Lupinus mutabilis*). Formulación de una mezcla base para productos alimenticios. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2, 239-252.

Llanos Arias, R., Llanos Arias, Y., & Chipana Mendoza, G. (2019). Elaboración de mermelada de Oca (*Oxalis tuberosa*) en la comunidad Chari, municipio de Charazani. *Revista Estudiantil Agro-Vet*, 3, 385-390.

Lucira Anticona, R. L. (2020). *Efecto del secado solar y convectivo en el contenido de vitamina C y capacidad antioxidante en trozos de durazno (*Prunus persica* L.) escaldado variedad Tilton.* Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo - Perú.

Medina Ochoa, M. A. (2022). *Efecto del tiempo de soleado de la oca (*Oxalis tuberosa*), sobre la capacidad antioxidante y concentración de los azúcares.* Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca - Perú.

- Mesinas, C. M., Pintor, D. A., Becerra, E. V., & Sobrevilla, N. M. (2020). Isotermas de secado en condiciones de laboratorio para pulpa de calabaza (cucúrbita pepo). *TECTZAPIC: Revista Académico-Científica*, 6, 128-134.
- Mina Medina, P. E. (2022). *Determinación de isotermas de adsorción para tuna (Opuntia tuna) deshidratada*. Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Pisco - Perú.
- Montes Montes, E. J., Torres Gallo, R., Andrade Pizarro, R. D., Pérez Sierra, O. A., Marimon Escobar, J. L., & Meza Herazo, I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Ingeniería e investigación*, 28(2), 45-52.
- Morata-Ramírez, M., Holgado-Tello, F. P., Barbero-García, I., & Mendez, G. (2015). Análisis factorial confirmatorio: recomendaciones sobre mínimos cuadrados no ponderados en función del error Tipo I de Ji-Cuadrado y RMSEA. *Acción psicológica*, 12(1), 79-90.
- Morocho, C. C., & Chunchu, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9, 71-83.
- Muenala Terán, N. A. (2021). *Uso de la oca (Oxalis tuberosa) para la elaboración de néctar*. Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Tulcán - Ecuador.
- Obando Moreno, L. F., & Vega Vega, E. (2019). *Proceso de secado de pituca (Colocasia Esculenta) en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional del Callao, Callao - Perú.
- Ocaña Palacios, I. A. (2019). *Caracterización fisicoquímica, nutricional y reológica de cultivos andinos infrautilizados*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador.
- Ochoa, C. Y. (2022). *Innovación y alimentación sostenible. Políticas y modelos cooperativos de logística y comercialización*. Paper presented at the La España rural: retos y oportunidades de futuro.

- Ordóñez, G. L. D. (2022). *Desarrollo de una bebida alcohólica destilada tipo (vodka) a partir de dos variedades de tubérculos, Papa China (Colocasia Esculenta) y Oca (Oxalis Tuberosa)*. Universidad del Azuay,
- Osorio, R. E. (2018). *Determinación del potencial de remoción de azul de metileno en solución acuosa de hueso de palta y carbón de hueso de palta*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso - Chile.
- Padilla-Frías, K. A., Granados-Conde, C., Leon-Mendez, G., Arrieta Pineda, Y., & Torrenegra-Alarcon, M. (2018). Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado. *Revista Imentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 16, 107 - 117.
- Palate Amaguaña, J. E. (2012). *Estudio del efecto de la temperatura y el tiempo en las características físico-químicas y sensoriales de la oca (Oxalis tuberosa) durante su maduración*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador.
- Palma, R. P. (2022). Análisis crítico del coeficiente de determinación (R²), como indicador de la calidad de modelos lineales y no lineales. *Matemática*, 20.
- Paramita, V., Kusumayanti, H., Yulianto, M., Rachmawati, D., Hartati, I., & Ardi, P. (2020). *Drying kinetic modelling of dried black potato (Plectranthus rotundifolius) cultivated in Indonesia*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Parra Coronado, A., Roa Mejía, G., Oliveros Tascón, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2017). Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino. In.
- Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food science & nutrition*, 7, 2921-2931.
- Ponce, S. D. C., Hanz, L. H., & de Moraes, K. (2021). Isotermas de sorção, modelagem matemática e propriedades termodinâmicas de polpa de banana verde. *Salão Integrado de Ensino Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX)*, 1.

- 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.
- Ramírez, D. B. (2021). *Modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de arracacha (Arracacia Xanthorrhiza B.)*. Universidad Nacional del Callao, Callao - Perú.
- Ramírez, M. M., Cruz, V. M., Vizcarra, M. M., & Anaya, S. 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.
- Razola Díaz, M. D. C., Guerra Hernández, E. J., Gómez-Caravaca, A. M., García Villanova, B., & Verardo, V. (2023). Mathematical modelling of drying kinetics of avocado peels and its influence on flavan-3-ols content and antioxidant activity. *LWT*, 114552.
- Reyes, E. R., Baquerizo, C. R., Pro, M. A. M., Molina, M. J. P., & Gavilanes, Y. M. P. (2021). Cinética del secado de las hojas de las especies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae).
- Robles Condori, N. (2016). *Efecto del tiempo y temperatura de pasteurización en el contenido de vitamina cy capacidad antioxidante en zumo de oca (Oxalis tuberosa Mol)*. Universidad Nacional del Altiplano, Ouno - Perú.
- Rojas Rojas, E. (2019). *Harina de oca (Oxalis tuberosa mol) en raciones balanceadas de cuyes mejorados en fase de crecimiento–engorde. Centro poblado Penachi–Salas–Lambayeque*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque - Perú.
- Saavedra, L. 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*. Universidad Nacional de Trujillo, Huamachuco - Perú.
- Salcedo-Mendoza, J. G., Contreras-Lozano, K., García-López, A., & Fernández-Quintero, A. (2016). Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca

- (Manihot esculenta Crantz). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 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, Riobamba - Ecuador.
- Shih, F., Daigle, K., & Champagne, E. (2011). Effect of rice wax on water vapour permeability and sorption properties of edible pullulan films. *Food Chemistry*, 127, 118-121.
- Sierra Puga, J., & Allca Ayala, V. (2022). *Isoterma de adsorción, propiedades funcionales y vida útil de la harina de chuño blanco de papa andina ccompis (Solanum tuberosum) proveniente de la Comunidad de Mollocco–Antabamba*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay - Perú.
- Silva, P. R. J., Mateo, M. D. K., Eccoña, S. A., & Della, R. P. (2022). Secado de hojas de muña (*Minthostachys mollis*): modelado, cinética y propiedades termodinámicas. *Enfoque UTE*, 13, 60-74.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food engineering*, 66(3), 323-328.
- Spiess, W., & Wolf, W. (1983). Results of the COST 90 project on water activity. *Physical properties of foods*.
- Spiess, W. E., & Wolf, W. (1987). Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms. In *Water activity: Theory and applications to food* (pp. 215-234): Routledge.
- Surendhar, A., Sivasubramanian, V., Vidhyeswari, D., & Deepanraj, B. (2019). Energy and exergy analysis, drying kinetics, modeling and quality parameters of microwave-dried turmeric slices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 185-197.

- Syah, H. (2022). *Drying Kinetics of Banana ((Musa paradisiaca L.) Slices in GHE Solar Dryer*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Vega Gálvez, A., Lara Aravena, E., & Lemus Mondaca, R. (2006). Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays L.*). *Food Science and Technology*, 26, 821-827.
- Viera-Arroyo, W. F., Tello-Torres, C. M., Martínez-Salinas, A. A., Navia-Santillán, D. F., Medina-Rivera, L. A., Delgado-Párraga, A. G., . . . Vásquez-Castillo, W. A. (2020). Control Biológico: Una herramienta para una agricultura sustentable, un punto de vista de sus beneficios en Ecuador. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 8, 128-149.
- Wang, J., Xiao, H.-W., Ye, J.-H., Wang, J., & Raghavan, V. (2019). Ultrasound pretreatment to enhance drying kinetics of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices: pros and cons. *Food and bioprocess technology*, 12, 865-876.
- Wolf, W., Spiess, W., & Jung, G. (1985). Standardization of isotherm measurements (COST-project 90 and 90 bis). In *Properties of water in foods* (pp. 661-679): Springer.
- Zapata Rivera, A. M., & Peña Varón, M. R. (2020). CFD model to characterize the transport of the flame retardant BDE 99 in a secondary facultative lagoon. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 43(1), 41-48.
- Zhu, F., & Cui, R. (2020). Comparison of physicochemical properties of oca (*Oxalis tuberosa*), potato, and maize starches. *International journal of biological macromolecules*, 148, 601-607.
- Zuniga Giraldo, A. D., Pinedo Arévalo, A., Silva Ferreira, A., Silva Ferreira, P., Serra Valdes, J. C., & Pavlak De Menezes, M. C. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas.