

ISSN 2521-8093



REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA



<http://www.ctscafe.pe>

Volumen IX- N° 27 Noviembre 2025

ISSN 2521-8093

2



Proceso híbrido de secado: deshidratación osmótica aplicado al secado convectivo del yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

Ing. Emmanuell Keith Atamarin Malpartida
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo: emmanuell.atamarinm@unmsm.edu.pe

Ing. Randy Dustin Tinco Fernández
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo: randy.tincof@unmsm.edu.pe

Mg. Jorge Luis Roca Becerra
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo: jorge.rocab@unmsm.edu.pe

Recibido: 16 Setiembre 2025 Aceptado: 03 Noviembre 2025



23

Resumen: El presente estudio aplicó el efecto previo de la deshidratación osmótica en rodajas de raíces de yacón al secado convectivo realizado a diferentes condiciones, obtener un modelo matemático que prediga su comportamiento y encontrar las mejores condiciones de secado. Para la deshidratación osmótica se utilizaron rodajas de 5 mm de espesor sumergidas en una solución osmótica de sorbitol a 65 °Brix por 12 horas; el secado se realizó en un secador de bandejas a temperaturas de 40°C, 50°C y 60°C y velocidades de flujo de aire de 2m/s y 3m/s. Se evaluó las condiciones adecuadas de secado y un modelo que prediga la cinética de secado en función a la humedad en base seca (X). Los resultados mostraron una reducción de humedad en deshidratación osmótica de 91.04% a 42.13% de humedad en base seca; las mejores condiciones de secado se dieron en 560 minutos a una temperatura de 60°C y una velocidad de 3 m/s. El modelado de la cinética de secado se evaluó en base a diez modelos matemáticos más utilizados en el secado convectivo aplicado al secado de alimentos en capa fina, el objeto de estudio siguió el comportamiento de la ecuación propuesta por Henderson & Pabis modificado. Para su elección se evaluaron los parámetros estadísticos: índice de correlación (R^2) más elevado y el menor error cuadrático medio (RMSE).

Palabras claves: Deshidratación osmótica/ Cinética de secado/ Capa fina/ Humedad en base seca.

Abstract: The present study applied the prior effect of osmotic dehydration on yacón root slices to convective drying carried out under different conditions, in order to obtain a mathematical model that predicts its behavior and to find the best drying conditions. For osmotic dehydration, 5 mm thick slices were immersed in a 65 °Brix sorbitol osmotic solution for 12 hours; drying was performed in a tray dryer at temperatures of 40°C, 50°C, and 60°C and air flow velocities of 2 m/s and 3 m/s. Suitable drying conditions were evaluated along with a model to predict drying kinetics as a function of moisture on a dry basis (X). The results showed a moisture reduction during osmotic dehydration from 91.04% to 42.13% moisture on a dry basis; the best

drying conditions were achieved in 560 minutes at a temperature of 60°C and an air velocity of 3 m/s. The modeling of drying kinetics was evaluated using ten of the most commonly used mathematical models in convective drying applied to thin-layer food drying. The object of study followed the behavior of the modified Henderson & Pabis equation. For its selection, statistical parameters were evaluated: the highest correlation index (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE).

Keywords: Osmotic dehydration/ Drying kinetics/ Thin layer/ Moisture on a dry basis.

Résumé: La présente étude a appliqué l'effet préalable de la déshydratation osmotique sur des tranches de racines de yacón au séchage convectif réalisé dans différentes conditions, afin d'obtenir un modèle mathématique qui prédise son comportement et de trouver les meilleures conditions de séchage. Pour la déshydratation osmotique, des tranches de 5 mm d'épaisseur ont été immergées dans une solution osmotique de sorbitol à 65 °Brix pendant 12 heures ; le séchage a été effectué dans un séchoir à plateaux à des températures de 40 °C, 50 °C et 60 °C et des vitesses de flux d'air de 2 m/s et 3 m/s. Les conditions de séchage appropriées ont été évaluées ainsi qu'un modèle pour prédire la cinétique de séchage en fonction de l'humidité sur base sèche (X). Les résultats ont montré une réduction de l'humidité lors de la déshydratation osmotique de 91,04 % à 42,13 % d'humidité sur base sèche ; les meilleures conditions de séchage ont été obtenues en 560 minutes à une température de 60 °C et une vitesse de 3 m/s. La modélisation de la cinétique de séchage a été évaluée à l'aide de dix modèles mathématiques les plus couramment utilisés dans le séchage convectif appliqué au séchage d'aliments en couche mince. L'objet d'étude a suivi le comportement de l'équation proposée par Henderson & Pabis modifiée. Pour sa sélection, les paramètres statistiques ont été évalués : l'indice de corrélation (R^2) le plus élevé et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) la plus faible.

Mots-clés : Déshydratation osmotique/ Cinétique de séchage/ Couche mince/ Humidité sur base sèche.

1. Introducción

El yacón es un tubérculo con un sabor dulce y agradable; motivo por el cual en algunas poblaciones es considerado como fruta debido a su peculiar característica. Actualmente estudios realizados han demostrado que su composición principal corresponde a 50 – 60% de fructooligosacáridos o FOS (Seminario Juan et al., 2003). Se considera al FOS como una fibra dietética y prebiótico perteneciente a la familia de los fructanos. Este tubérculo además de tener un bajo aporte calórico contiene una alta cantidad de agua (83% - 90%), dentro de su estructura motivo por el cual suele tener un corto tiempo de conservación, valores encontrados por Gonzáles Marlo et al. (2019), reportaron humedades iniciales de 86.65% y Carhuallanqui P. (2019), valores de 91.035%.

Es por ello que se aplicará un método combinado de secado, aplicando el método de deshidratación osmótica para reducir parcialmente el contenido de agua del tubérculo, que dependiendo de las condiciones de operación puede eliminarse hasta un 70% de agua contenida, esto debido a la transferencia de masa entre la solución hipertónica y el producto por acción de fuerzas impulsoras de gradiente de concentración; un proceso de contradifusión simultánea de sólidos solubles de la solución hacia el producto y agua contenida del producto hacia la solución osmó-

tica. (Ochoa-Martínez & Ayala-Aponte, 2005). Esto conlleva beneficios adicionales al secado convencional como obtener un producto más apetecible debido a la ganancia de sólidos de la solución al producto y además de protegerlo de la abrasión del aire caliente forzado manteniendo así su estructura, debido a la formación de una capa protectora obtenida en el procedimiento osmótico. (Acevedo et al., 2014).

Por otro lado, el secado convectivo se define como una operación unitaria que consiste en extraer la mayor cantidad de agua contenida en un sólido por medio de una corriente de un gas caliente, que en su mayoría suele ser aire, como medio transportador llevándose a cabo fenómenos en simultáneo de transferencia de masa y energía expresados en gradientes de concentración y temperatura. La velocidad de secado es representada generalmente por un diagrama que expresa la humedad del sólido (humedad en base seca), con respecto al tiempo de operación (X vs. t), generándose la curva de secado. (Angeles Q., 2012).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Reactivos

Ácido cítrico

Hipoclorito de sodio

Sorbitol

2.1.2. Equipos

Secador de bandejas

Balanza de humedad ADAM AMB 50

Balanza analítica EXELTOR

Refractómetro ATAGO PR-301

Anemómetro tipo Medidor Digital Genérico, Modelo – 1000285115

Agitador magnético tipo MMS - 3000

Estufa Binder VD 115

Computadora

2.2. Métodos

El estudio del secado convectivo se realizó considerando una combinación factorial 3x2, utilizando como variables a controlar la temperatura de secado y la velocidad del flujo del aire. El estudio consiste en dos factores: temperatura con tres niveles 40, 50, 60 °C y velocidad del flujo del aire con dos niveles 2 y 3 m/s. (ver tabla 1.)

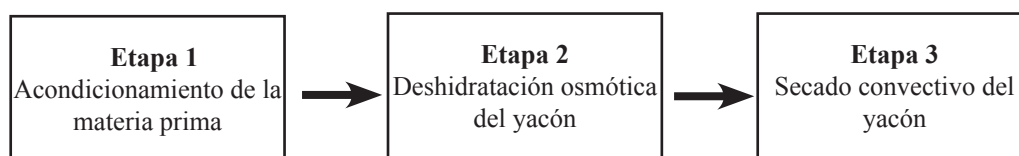
Tabla N° 1: Factores y niveles de parámetros

Factor	Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)
Nivel 1	T_1	v_1
Nivel 2	T_2	v_2
Nivel 3	T_3	-

Fuente: Elaboración propia

Las fases de la investigación se desarrollan en tres etapas (ver gráfico N°1.)

Gráfico N° 1: Etapas de la investigación



Fuente: Elaboración propia

En la etapa 1 se obtienen las raíces del yacón de un mercado mayorista proveniente de la provincia de Huánuco – Perú, se eliminó todas las impurezas con una solución de hipoclorito de sodio, para luego realizar la inactivación enzimática mediante blanqueado a 90°C por 3 minutos de las muestras. En la etapa 2 se preparó una solución de sorbitol a 65°Brix utilizando un agitador magnético tipo MMS – 3000; las rodajas fueron sumergidas en la solución por un tiempo de 12 horas a temperatura ambiente de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, terminado el tiempo de sumersión las rodajas se enjuagaron con agua destilada, se secó con paño absorbente y se procedió a medir la humedad en una balanza de humedad ADAM AMB 50. En la etapa 3 las muestras osmóticamente deshidratadas fueron colocadas en una rejilla de 20cm x 14.5cm x 1cm, de manera uniforme y en toda el área de la rejilla, con la finalidad de que el secado se realice de manera homogénea dentro del secador de bandejas. La humedad final se obtuvo mediante balanza de humedad ADAM AMB 50. Las muestras fueron pesadas en intervalos de tiempo definidos y se registró el peso mediante una balanza analítica para la construcción de la curva de secado.

El modelado de la curva de secado experimental se realizó utilizando el software Polymath Professional Versión 6.1, realizando regresiones del tipo no lineal a 10 modelos empíricos propuestos en la investigación referenciados de la literatura. Se busca el ajuste más adecuado de los datos experimentales y se establecerán los coeficientes de cada modelo matemático. Estos modelos describen el comportamiento de secado teniendo en cuenta la temperatura, el efecto conjunto de tamaño y forma de las partículas, la velocidad del aire, entre otros factores.

Cada modelado realizado a las distintas condiciones de operación, mostró parámetros que predicen que tanto se ajusta la curva experimental a la teórica, dichos parámetros estadísticos son

el índice o coeficiente de correlación (R^2), y el error cuadrático medio (RMSE). Un valor de R^2 **más elevado y un valor de RMSE más cercano a cero serán los considerados para la elección del modelo que prediga el comportamiento de la curva de secado experimental.**

Tabla N° 2: Modelos matemáticos empíricos para secado de alimentos en capa fina

MODELOS MATEMÁTICOS		
1	Newton	$x = e^{-kt}$
2	Page	$x = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$x = a \cdot e^{-kt}$
4	Logarítmica	$x = a \cdot e^{-kt} + c$
5	Dos Términos	$x = a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-gt}$
6	Dos términos exponenciales	$x = a \cdot e^{-kt} + (1-a) \cdot e^{-k_2t}$
7	Yaldin y Erteking	$x = a \cdot e^{-kt} + (1-a) \cdot e^{-k_2t}$
8	Henderson y Pabis Modificado	$x = a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-gt} + c \cdot e^{-ht}$
9	Verma	$x = a \cdot e^{-kt} + (1-a) \cdot e^{-gt}$
10	Midilli	$x = a \cdot e^{-kt^n} + b \cdot t$

Fuente: Agbossou, 2016

3. Resultados

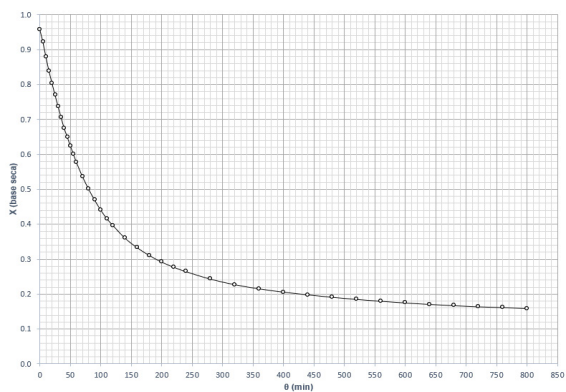
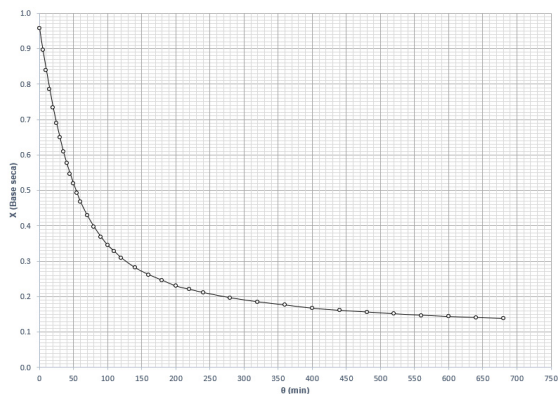
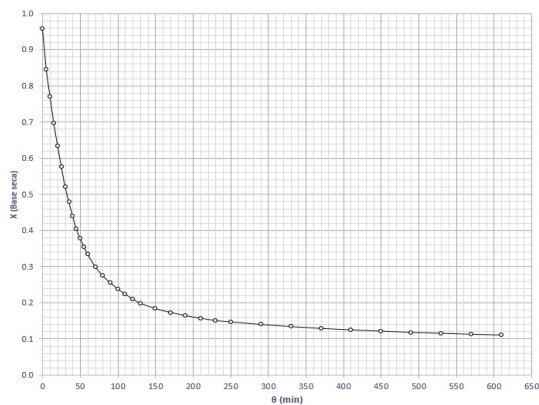
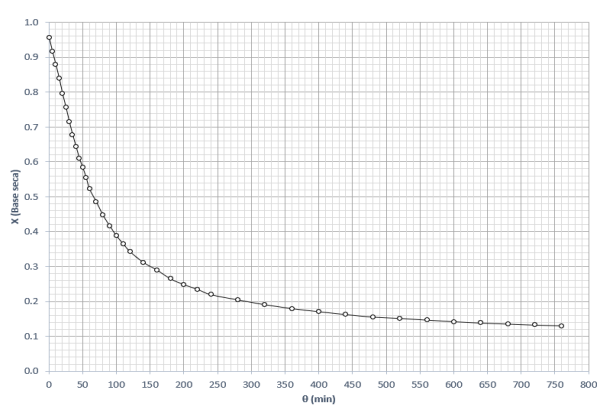
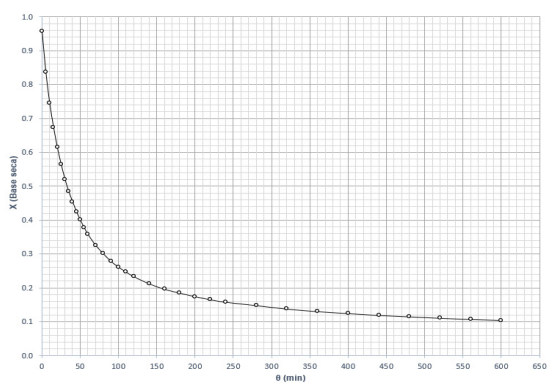
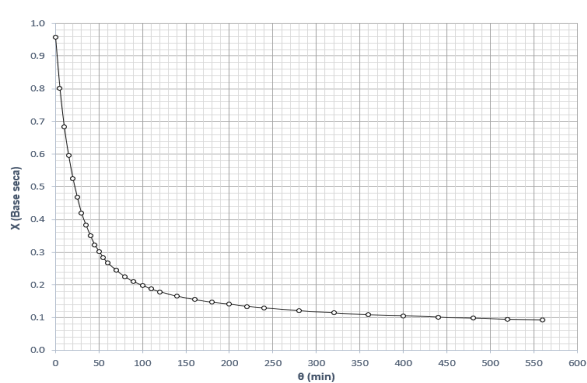
La efectividad de la deshidratación osmótica (DO), en la reducción del contenido de humedad de las muestras fue evaluada mediante su medición en una balanza de humedad ADAM AMB 50, para todos los ensayos realizado (ver tabla 2).

Tabla N° 3: Humedad inicial y final de DO

Exp.	% Humedad inicial DO	% Humedad final DO
1	90.57	48.50
2	90.86	48.26
3	92.99	50.64
4	90.78	48.40
5	90.13	48.26
6	90.88	49.40
PROMEDIO	91.04	42.13

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se graficó los resultados de las pruebas de secado establecidas a las condiciones propuestas, las gráficas representan la variación de la disminución del peso expresado como contenido de humedad en base seca (X), en función del tiempo (θ) dado en minutos.

Gráfico N° 2: Curvas de secado*Curva de secado 40°C y 2 m/s**Curva de secado 50°C y 2 m/s**Curva de secado 60°C y 2 m/s**Curva de secado 40°C y 3 m/s**Curva de secado 50°C y 3 m/s**Curva de secado 60°C y 3 m/s***Fuente:** Elaboración propia

Modelado de las curvas de secado convectivo

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente, fueron regresionados para determinar el ajuste del comportamiento de la disminución de humedad en función del tiempo, a los modelos empíricos mostrados en la tabla 2. Se muestran las constantes de cada modelo a las distintas condiciones de temperatura y velocidad de flujo del aire.

Tabla N° 4: Constantes de modelos empíricos a 2 m/s

MODELO	CONSTANTE	40°C	50°C	60°C
Newton	k	0.0069267	0.0104321	0.0171681
Page	k	0.0520887	0.0748277	0.1111332
	n	0.5719803	0.5470547	0.5292147
Henderson & Pabis	a	0.8262616	0.8177091	0.8280285
	k	0.0044903	0.0069128	0.0125145
Henderson & Pabis modificado	a	0.2792985	0.6382716	0.6667540
	k	0.0014156	0.0206354	0.0307586
	b	0.0299923	0.2541868	0.1554504
	g	-0.0010462	0.0028781	0.0074515
	c	0.6556218	0.0694861	0.1335274
	h	0.0135795	-0.0005757	0.0003325
Logarítmico	a	0.7643435	0.7698296	0.7944939
	k	0.0105754	0.0179621	0.0231408
	c	0.1832508	0.1673707	0.1379921
Dos términos	a	0.2729276	0.6945440	0.7483941
	k	0.0007157	0.0188663	0.0273323
	b	0.6900170	0.2635024	0.2016684
	g	0.0128995	0.0010459	0.0011208
Exponencial de dos términos	a	0.2231130	0.2283565	0.2450012
	k	0.0219371	0.0326170	0.0508464
Yaldin Erteking	a	0.6970590	0.7121982	0.7805354
	k	0.0147521	0.0214230	0.0306619
	b	0.0603445	0.0575495	0.0436039
Verma	a	0.6970585	0.7121970	0.7805354
	k	0.0147521	0.0214231	0.0306619
	g	0.0008902	0.0012329	0.0013370
Midilli	a	0.9974376	0.9980379	0.9939473
	k	0.0260430	0.0412383	0.0634878
	n	0.7481583	0.7072378	0.6867874
	b	0.0002092	0.0002246	0.0002305

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5: Constantes de modelos empíricos a 3 m/s

MODELO	CONSTANTE	40°C	50°C	60°C
Newton	k	0.0085501	0.0162295	0.0234892
Page	k	0.0512303	0.1182674	0.1633123
	n	0.6027357	0.5060556	0.4800924
Henderson & Pabis	a	0.8597504	0.7874942	0.7986974
	k	0.0062659	0.0105648	0.0163746
Henderson & Pabis modificado	a	0.7124156	0.2833912	0.1545555
	k	0.0150699	0.0604479	0.0009478
	b	0.2571231	0.4748141	0.2658888
	g	0.0012758	0.0171132	0.0157249
	c	0.0074771	0.1961095	0.5337844
	h	-0.0019235	0.0010967	0.0548696
Logarítmico	a	0.8036350	0.7572272	0.7807534
	k	0.0121304	0.0209441	0.0309220
	c	0.1561897	0.1419286	0.1300980
Dos términos	a	0.7317307	0.6740186	0.2165933
	k	0.0146426	0.0289329	0.0018187
	b	0.2440295	0.2580967	0.7234045
	g	0.0008752	0.0017535	0.0401019
Exponencial de dos términos	a	0.2380175	0.2263905	0.2427340
	k	0.0253675	0.0525044	0.0710444
Yaldin Erteking	a	0.7385699	0.7093967	0.7653018
	k	0.0158201	0.0350702	0.0458360
	b	0.0630815	0.0598168	0.0454317
Verma	a	0.7385698	0.7093968	0.2346982
	k	0.0158202	0.0350702	0.0020824
	g	0.0009980	0.0020978	0.0458360
Midilli	a	1.0044850	0.9861745	0.9888447
	k	0.0273954	0.0744449	0.1043442
	n	0.7676341	0.6329362	0.6108762
	b	0.0001984	0.0001962	0.0002132

Fuente: Elaboración propia

Los modelos fueron analizados en el software Minitab Statistical 22, para la elección del más adecuado. Un valor de R^2 más elevado y un valor de RMSE más cercano a cero serán los considerados para la elección del modelo que prediga el comportamiento de la curva de secado experimental.

Tabla N° 6: Parámetros estadísticos de modelos a 40°C

MODELO	2 m/s		3 m/s	
	R ²	RSME	R ²	RSME
Newton	0.8323605	0.0164319	0.8776206	0.0146827
Page	0.9731609	0.0065748	0.9708720	0.0071632
Henderson &Pabis	0.8941625	0.0130563	0.9102851	0.0125714
Henderson &Pabis modificado	0.9994160	0.0003066	0.9994677	0.0009684
Logarítmico	0.9976552	0.0019434	0.9970443	0.0022818
Dos términos	0.9998928	0.0004155	0.9994417	0.0009917
Exponencial de dos términos	0.8958165	0.0129539	0.9229862	0.0116476
Yaldin Erteking	0.9981803	0.0017120	0.9987733	0.0014700
Verma	0.9981803	0.0017120	0.9987733	0.0014700
Midilli	0.9958078	0.0025985	0.9940213	0.0032453

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 7: Parámetros estadísticos de modelos a 50°C

MODELO	2 m/s		3 m/s	
	R ²	RSME	R ²	RSME
Newton	0.8240079	0.0168277	0.8065496	0.0169637
Page	0.9696704	0.0069857	0.9759807	0.0059774
Henderson &Pabis	0.8817502	0.0137936	0.8779431	0.0134746
Henderson &Pabis modificado	0.9999559	0.0002665	0.9999374	0.0003052
Logarítmico	0.9955767	0.0026678	0.9891549	0.0040165
Dos términos	0.9997701	0.0006082	0.9983320	0.0015752
Exponencial de dos términos	0.8843092	0.0136436	0.8702137	0.0138947
Yaldin Erteking	0.9977506	0.0019024	0.9936419	0.0030754
Verma	0.9977506	0.0019024	0.9936419	0.0030754
Midilli	0.9940643	0.0030904	0.9947247	0.0028013

Fuente: Elaboración propia

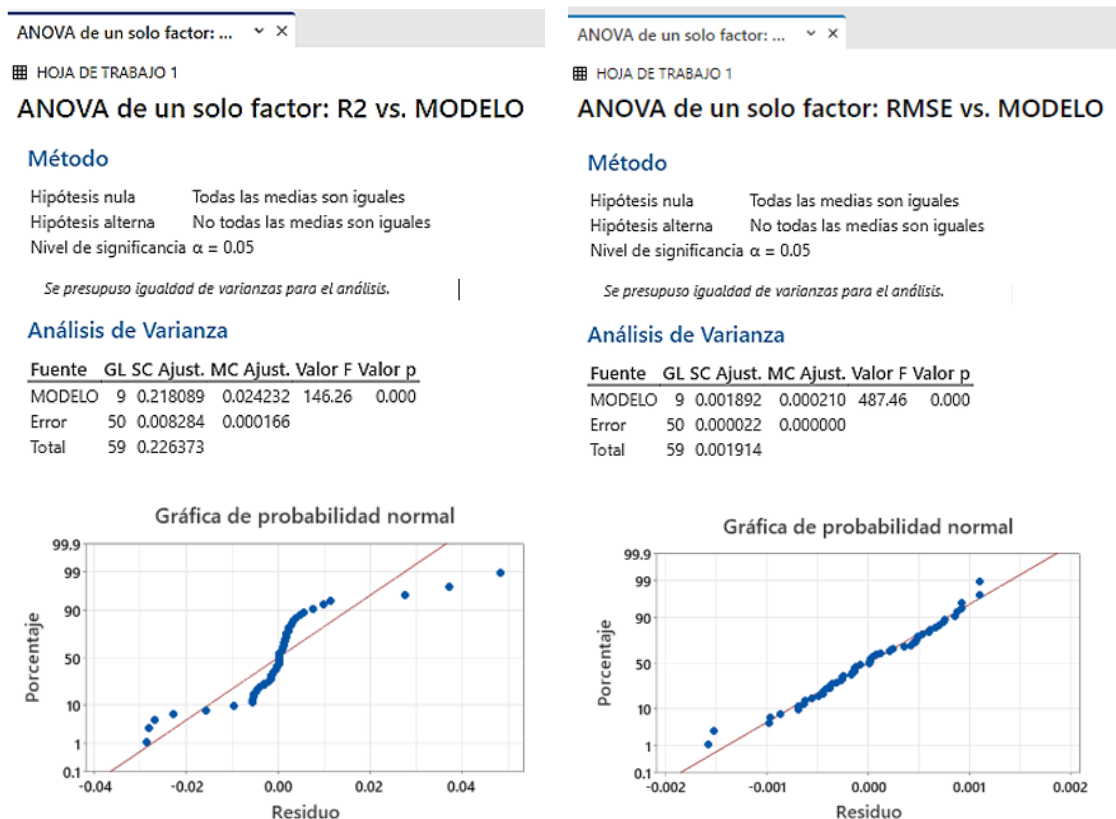
Tabla N° 8: Parámetros estadísticos de modelos a 60°C

MODELO	2 m/s		3 m/s	
	R ²	RSME	R ²	RSME
Newton	0.8348444	0.0157208	0.8006382	0.0166807
Page	0.9589909	0.0078337	0.9628704	0.0071987
Henderson &Pabis	0.8771596	0.0135581	0.8558325	0.0141850
Henderson &Pabis modificado	0.9998233	0.0005142	0.9999426	0.0002831
Logarítmico	0.9954608	0.0026063	0.9883968	0.0040242
Dos términos	0.9995168	0.0008503	0.9985765	0.0014095
Exponencial de dos términos	0.8844752	0.0131482	0.8578888	0.0140834
Yaldin Erteking	0.9968721	0.0021635	0.9949618	0.0026518
Verma	0.9968721	0.0021635	0.9949618	0.0026518
Midilli	0.9908823	0.0036938	0.9889794	0.0039219

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis de varianza ANOVA de un solo factor en el programa Minitab, que relaciona los modelos matemáticos empíricos con el índice de correlación R^2 y error cuadrático medio RMSE.

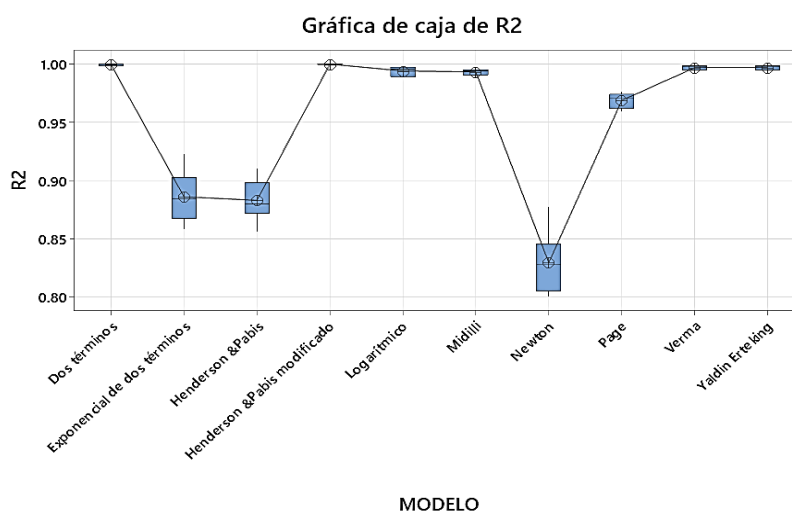
Figura N°3: Análisis de varianza ANOVA de R^2 y RMSE vs. modelos



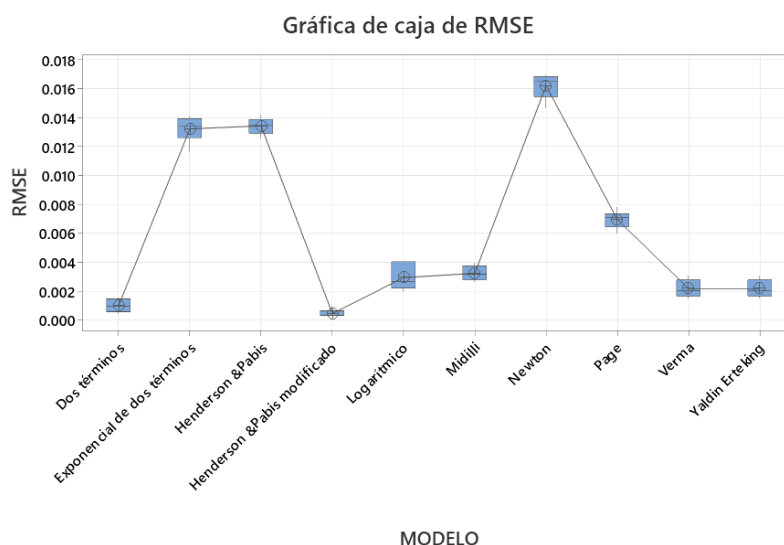
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de dispersión de datos y variabilidad de los mismos se pueden representar mediante gráficas de cajas.

Figura N°4: Gráfico de cajas de R^2 vs. Modelos



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5: Gráfico de cajas de RMSE vs. modelos

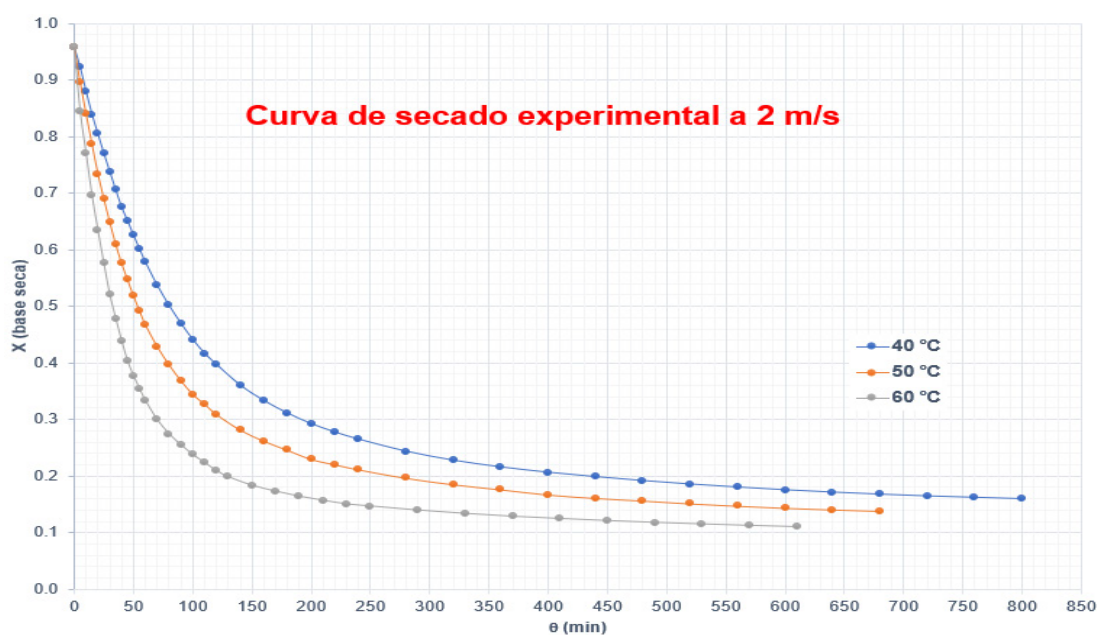
Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

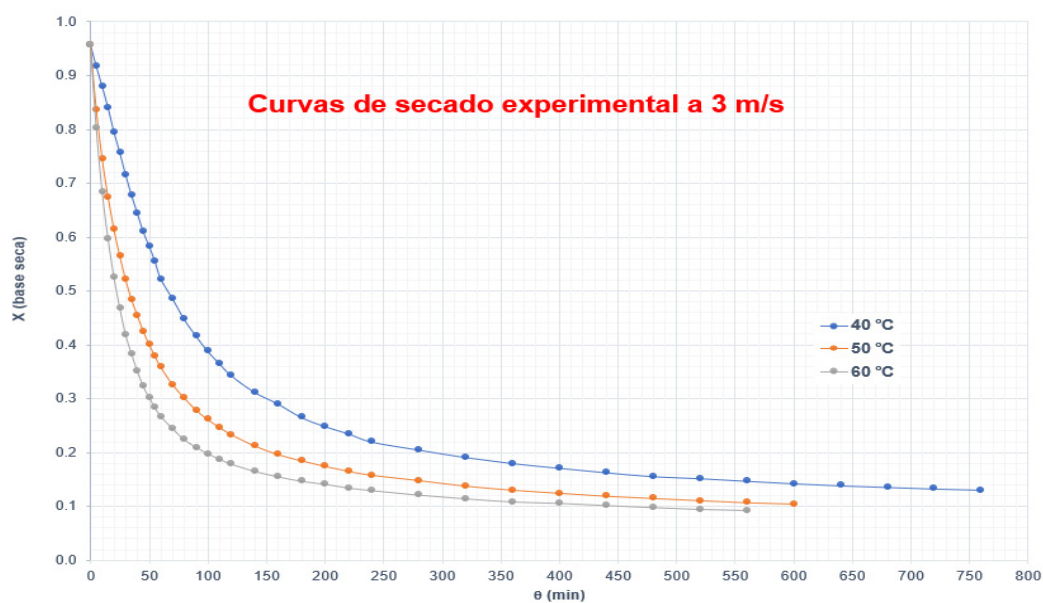
La aplicación de deshidratación osmótica evidencia cambios notorios como la permanencia de la textura del producto, coloración, un aumento en el sabor debido a la inclusión de azúcares de la solución osmótica al producto y reducción del tamaño y peso debido a la expulsión de agua de su estructura molecular. Los resultados reportaron una disminución en 42.13% de humedad promedio, valores similares encontrados de DO aplicados a raíces de yacón fueron los obtenidos por Quispe Talla et al., (2008), con valores de humedad final de 48.91%, Carhuallanqui P. (2019) utilizando rodajas de 0.5cm de espesor, pulso de vacío de 441.93 mbar, concentración de 43.4°Brix y temperatura de 56.82°C por 150 minutos obtuvo una humedad final de 74.5%, lo que contrasta que la aplicación de la DO influye directamente en el secado de rodajas de yacón.

En el secado convectivo llevado a cabo en un secador de bandejas los resultados de curva de humedad construidas a partir de los datos de pérdida de peso fueron graficados en el programa Microsoft Excel LTSC Professional Plus 2021 y muestran el comportamiento del secado en las condiciones planteadas. La sectorización de las curvas de secado para distinguir un periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente es evidenciada por un punto de inflexión denominado humedad crítica (X_c), que indica el cambio de la dependencia de las condiciones de secado, es decir un periodo de velocidad constante que depende de las condiciones externas a un periodo de velocidad decreciente que depende de las condiciones internas o de la estructura del producto.

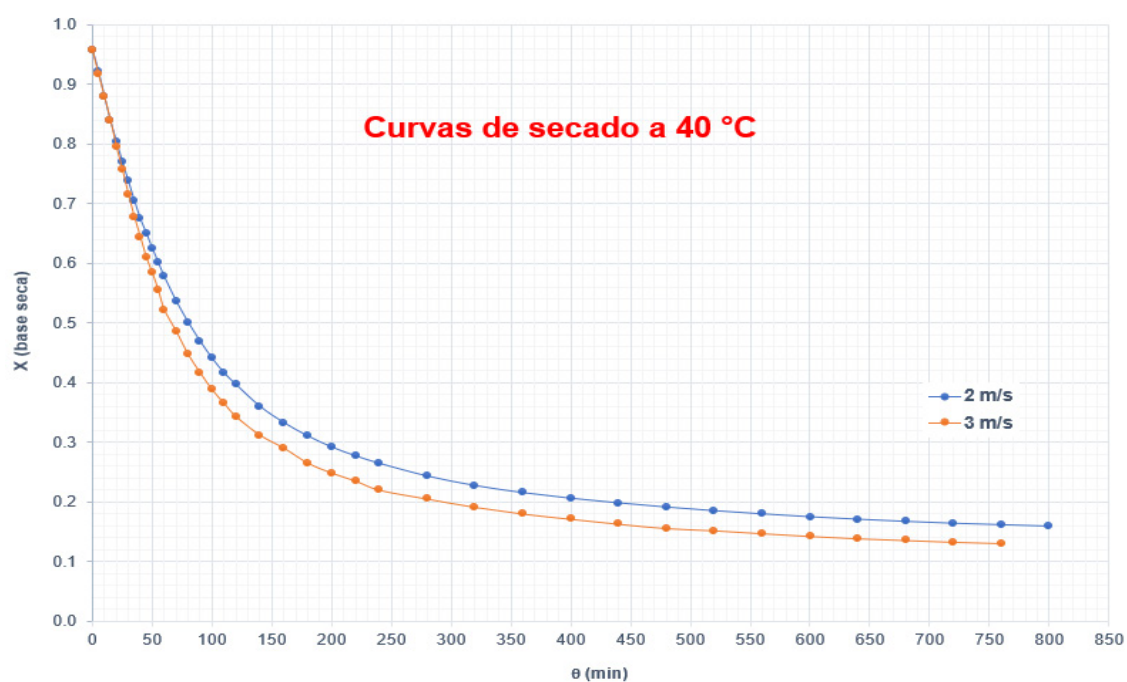
Los resultados muestran un tiempo de velocidad constante inferior al periodo de velocidad decreciente, esto evidencia la teoría de un inicio corto y constante de secado debido a la evaporación instantánea de la humedad libre (H^*), definida como la humedad superficial de la muestra que tiende a evaporarse primero y que depende de las condiciones externas del ambiente. El efecto de la temperatura y la velocidad del flujo del aire dependen en la velocidad de secado, aumentando o reduciendo el tiempo de secado y la humedad de equilibrio. (ver figura 6 – 10).

Figura N° 6: Curva de secado experimental a 2m/s

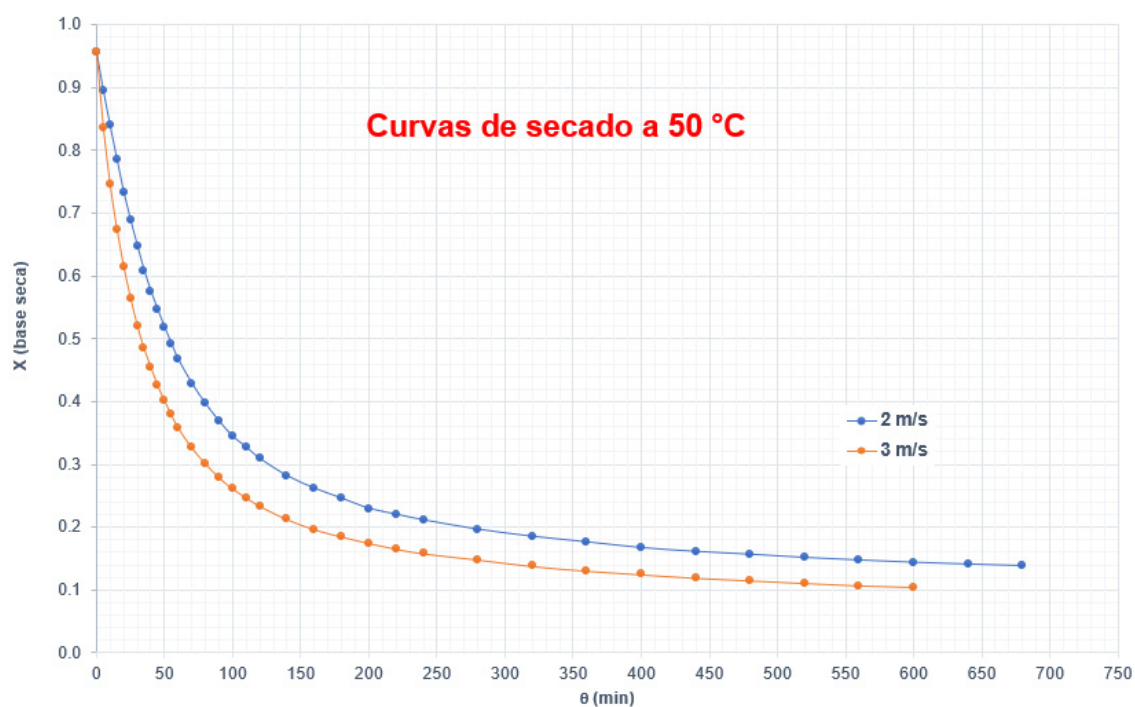
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 7: Curva de secado experimental a 3m/s

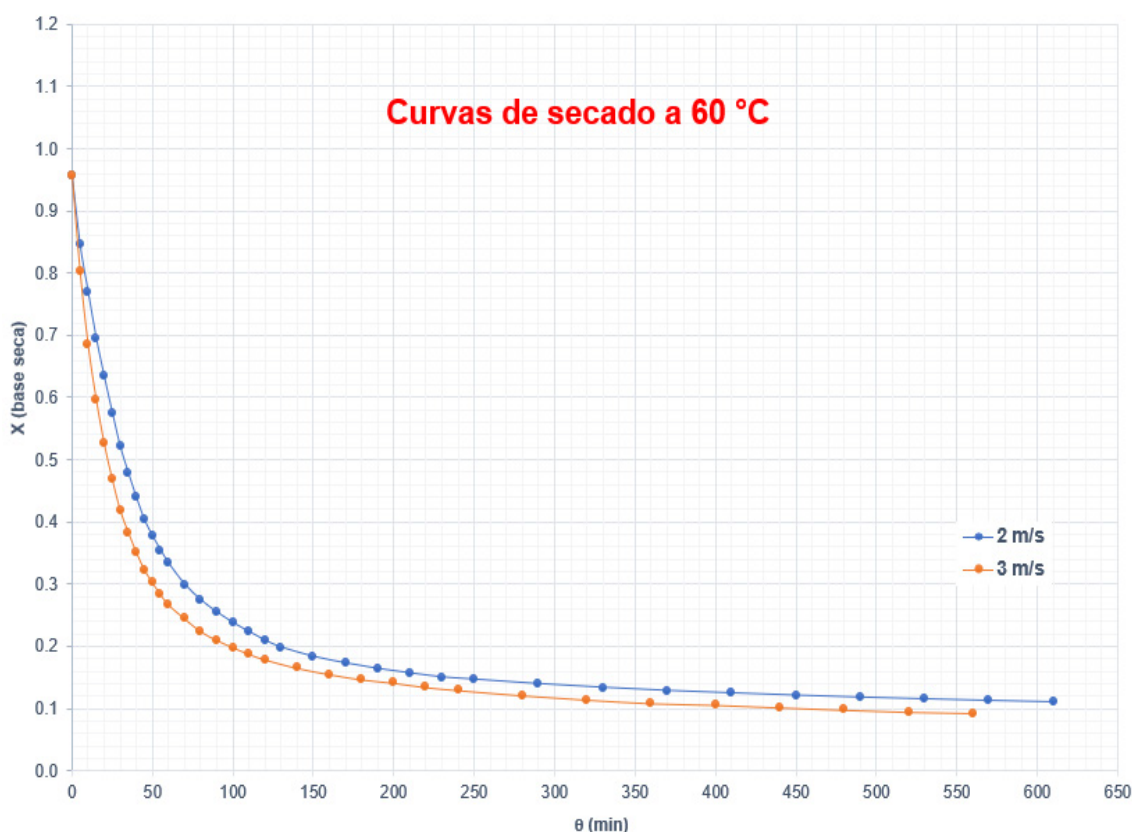
Fuente: Elaboración propia

Figura N°8: Curva de secado experimental a 40°C

Fuente: Elaboración propia

Figura N°9: Curva de secado experimental a 50°C

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 10: Curva de secado experimental a 60°C

Fuente: Elaboración propia

Para ambas condiciones de velocidad del flujo del aire de secado (ver figuras 6 y 7), la temperatura influye en la velocidad de secado, es decir se obtiene un menor tiempo para llegar a la humedad de equilibrio ante un aumento de la temperatura.

En todos los casos, el secado se inicia con el periodo de velocidad constante, notándose un menor tiempo para la temperatura de 60°C para 2 y 3 m/s de velocidad de aire de secado. Así pues, el efecto de la temperatura sobre la velocidad de secado influye positivamente en la reducción del tiempo de secado para alcanzar una menor humedad de equilibrio.

Por otro lado, el efecto de la velocidad del flujo del aire sobre las temperaturas de 40, 50 y 60 °C (ver figuras 8 – 10), notan un efecto directamente proporcional a la velocidad de secado e inverso al tiempo del mismo; es decir, que se observan menores tiempos de secado para obtener la humedad de equilibrio a la velocidad de 3m/s. Una mayor velocidad de flujo de aire implica un efecto positivo para el periodo de velocidad constante y decreciente para lograr la obtención de la humedad de equilibrio en un menor tiempo.

El modelado de la cinética de secado describe el comportamiento del secado convectivo en capa fina de rodajas de yacón previamente sometidas a deshidratación osmótica. El análisis ANOVA de un factor aplicado a los coeficientes de correlación R^2 (ver figura 3) arroja un valor $p = 0$ ($< 0,05$), lo que lleva a rechazar la hipótesis nula de igualdad entre todas las medias de R^2 y a aceptar la hipótesis alternativa: al menos una media difiere. Esto confirma que los modelos propuestos presentan diferencias significativas en su capacidad para describir la curva de secado del yacón osmodeshidratado.

De igual forma, el ANOVA de un factor sobre el error cuadrático medio RMSE (ver figura 3) arroja $p = 0$ ($< 0,05$), rechazándose la hipótesis nula de igualdad entre las medias de RMSE y aceptándose la alternativa: al menos una media es distinta. Así, se verifica que los modelos difieren significativamente en la precisión con que reproducen la curva de secado.

Los residuos de R^2 y RMSE exhiben una distribución cercana a la normal, como se observa en la figura 3:

- En la gráfica de probabilidad normal (Porcentaje vs. Residuo), los puntos siguen la línea de normalidad.
- En la gráfica de Residuos vs. Ajustes, los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea cero.
- En el histograma de Residuos vs. Frecuencia, la forma se aproxima a una campana de Gauss. Todo ello indica que los resultados siguen un comportamiento aproximadamente normal.

Las gráficas de valores individuales y de cajas (figuras 4 y 5) para R^2 y RMSE revelan diferencias significativas entre las medias, con menor variabilidad (cajas más estrechas) y mayor tendencia central en los modelos Dos Términos, Henderson & Pabis modificado, Verma y Yaldiz Erteking. La selección del modelo más adecuado se basó en la regresión de los datos experimentales mediante el software Polymath Professional 6.1, priorizando R^2 más cercano a 1 y RMSE más cercano a cero. Los modelos Logarítmico y Midilli también muestran baja variabilidad, pero sus valores promedio de R^2 están más alejados de 1 y los de RMSE más lejos de cero en comparación con los cuatro modelos anteriores, sin embargo, el modelo **Henderson & Pabis modificado** es el que más se adecua debido a una menor variabilidad y tendencia alta de índice de correlación y bajo error cuadrático medio, modelo que describirá el comportamiento del secado del estudio presente.

Estudios similares al secado convectivo fueron los realizados por Zielinska & Markowski (2010), para el secado de zanahoria a temperaturas de 60, 70, 80, 90 °C, velocidad del aire de 7 m/s, mostraron una humedad de equilibrio de 6% y modelo de Dos *términos*, el estudio de Doymaz (2004) también para muestras de zanahoria a condiciones de 50, 60, 65 y 70°C y velocidad de aire de 0.5 y 1 m/s mostraron una humedad de equilibrio de 6% y el modelo cinético de Page, además, el estudio de (Olurin et al., 2012), para muestras de calabaza en condiciones de secado de 60, 80°C y velocidad de aire de 1.5 m/s, alcanzaron una humedad de equilibrio de 11%, identificando el modelo Logarítmico; asimismo, Charmongkolpradit & Luampon (2017), para muestras de yuca a temperatura de 50, 60 y 70°C, mostraron como modelo Midilli para describir la curva de secado.

5. Conclusiones

- El secado convectivo de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en un secador de bandejas, cuando se combina con deshidratación osmótica previa, se ve afectado directamente por la temperatura y la velocidad del aire. Ambos parámetros reducen significativamente el tiempo de secado, y el modelo modificado de Henderson & Pabis es el que mejor ajusta y describe el comportamiento cinético observado.
- Al aplicar deshidratación osmótica a rodajas de yacón de 5 mm de espesor, utilizando una solución de sorbitol a 65 °Brix durante 12 horas de inmersión, se alcanza una humedad final de 48,91 %, lo que representa una disminución del 42,13 % en el contenido inicial de agua.
- El aumento de la temperatura de secado ejerce un efecto favorable, acortando el tiempo necesario y disminuyendo la humedad final. El mejor resultado se obtuvo a 60 °C, logrando una humedad de 0,0928 kg H₂O/kg de sólidos secos en 560 minutos.
- De manera similar, incrementar la velocidad del flujo de aire reduce tanto el tiempo de secado como el contenido final de humedad. La condición óptima se alcanzó con una velocidad de 3 m/s, obteniendo igualmente una humedad final de 0,0928 kg H₂O/kg de sólidos secos en 560 minutos.

6. Literatura citada

- Acevedo, D., Tirado, D., & Guzmán, L.** (2014). Deshidratación osmótica de pulpa de tamarindo (*tamarindus indica* L.): influencia de la temperatura y la concentración. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 17(1), 123–130.
- Ángeles Queirolo Carlos Ernesto.** (2012). Secado por medio de aire caliente del pimiento (*Capsicum annum*) variedad piquillo.
- Carhuallanqui Palian Liberata, & Zapata Huarcaya Liliana Alison.** (2019). Proceso de secado de la oca (*oxalis tuberosa*) en un secador rotatorio discontinuo. Universidad Nacional del Callao.
- Charmongkolpradit, S., & Luampon, R.** (2017). Study of Thin Layer Drying Model for Cassava Pulp. *Energy Procedia*, 138, 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.138>
- Doymaz, I.** (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 359–364. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00142-0)
- Gonzáles Marlo, E., Flores Quintos, V., & León Roque, N.** (2019). Deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) sumergido en jugo de yacón concentrado. In *Technology Journal Technology Journal Functional Food Science and Technology Journal* (Vol. 1, Issue 1). <http://revistas.unprg.edu.pe/openjournal/index.php/cytaf>

- Ochoa-Martínez, C. I.; & Ayala-Aponte, A.** (2005). Mathematical models of mass transfer in osmotic dehydration. *Cienc. Tecnol. Aliment*, 4(5), 330–342. www.altaga.org/cyta
- Olurin, T. O., Adelekan, A. O., & Olosunde, W. A.** (2012). Mathematical modelling of drying characteristics of blanched field pumpkin (*Cucurbita pepo* L) slices. 14(4). <http://www.cigrjournal.org>
- Quispe Talla, Á. N., Ramírez Rodríguez, J., & Castro Vicente, N.** (2008). Deshidratación osmótica del yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en altas concentraciones de fructo - oligosacáridos.
- Seminario Juan, Valderrama Miguel, & Iván Manrique.** (2003). El yacón, fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio.
- Zielinska, M., & Markowski, M.** (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2), 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.12.005>

ÍNDICE DE IMÁGENES

1. Ostos, Atuncar (2025)
2. Ostos, Atuncar (2025)
3. Ostos, Atuncar (2025)
4. <https://www.lahuertinagarden.com.ar/plantas-nativas/planta-de-yacon>
5. <https://www.bioecoactual.com/2025/08/21/yacon-raiz-dulce-nutritiva-andes/>
6. <https://nutrydiaperu.com/tienda/yacon-pulpa-en-pollo-x-500g/>
7. <https://vitallanosperu.com/producto/yacon-deshidratado-en-hojuelas-y-harina-de-yacon/>
8. https://tiendakarcher.pe/blog/consejos-limpieza-carros/?srsltid=AfmBOoog3kw8QlyNH_GO-CL5Jnbj18Key0sra1kawi3k-tQId09Kr2h_H
9. <https://pimentel.com.pe/carwash/>
10. <https://lavaderodeautoscarwash.com/los-carwash-crecen-en-lima/>
11. <https://www.ascensoresorbit.pe/>
12. <https://www.schindler.pe/es/ascensores/modernizacion/componentes/cabinas.html>
13. <https://facara.com.ar/seguiridad-en-ascensores-consejos-para-elegir-a-una-empresa-de-mantenimiento/>
14. <https://www.expreso.com.pe/politica/vacancia-de-dina-boluarte-advierten-que-decision-del-congreso-no-respeto-debido-proceso-tribunal-constitucional-juan-carlos-portugal-noticia/1230597/>
15. <https://diarioelpueblo.com.pe/2023/07/25/las-elecciones-en-el-congreso/>
16. <http://www.spanish.xinhuanet.com/20251010/f5bf10d7f507468c9e59a04577a6ba4f/c.html>
17. <https://larepublica.pe/sociedad/2025/10/28/parade-transporte-el-4-de-noviembre-estas-son-las-rutas-y-lineas-que-suspenderan-sus-servicios-en-lima-y-callao-ntpe-2053520>
18. <http://eldiario24.com/mundo/2025/10/16/peru-heridos-jose-geri/>
19. <https://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/un-muerto-y-mas-de-100-heridos-en-lima-peru-durante-protestas-contras-el-nuevo-gobierno-de-jose-geri-3500349>
20. <https://oem.com.mx/elsoldemexico/gossip/jovenes-rinden-homenaje-a-truko-el-rapero-muerto-a-manos-de-la-policia-en-protesta-en-lima-peru-26325154>
21. <https://galvezmonteagudo.pe/mineria-ilegal-vs-mineria-informal-un-problema-vigente/>
22. <https://cooperacion.org.pe/gobierno-alistaria-ley-sobre-mineria-informal/>
23. <https://convoca.pe/investigacion/arequipa-epicentro-de-la-guerra-del-oro>
24. <https://portal.jne.gob.pe/portal/Pagina/Nota/17603>
25. <http://ceramicdictionary.com/es/a/4360/clay-0-making-clay-in-constructionhttps://es.pinterest.com/hippieflower1969/the-french-revolution/>
26. <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/ladrillos-piramide-invertira-us-800-millones-2021-235206-noticia/>
27. https://www.freepik.com/premium-ai-image/red-truck-with-lot-bricks-front-word-g-front_187626342.htm
28. https://www.linkedin.com/posts/yapeoficial_feliz-d%C3%ADa-del-trabajador-gracias-a-actividad-7191529441297125377-gCio/?originalSubdomain=es
29. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-38974595>
30. <https://www.realinstitutoelcano.org/comentarios/como-se-ha-vivido-en-china-la-victoria-de-trump-y-que-implicaciones-tiene-para-las-relaciones-sino-europeas/>
31. https://www.theguardian.com/world/2019/sep/16/kim-jong-un-invites-donald-trump-to-visit-pyongyang-report?CMP=gu_com



De izquierda a derecha

32. <https://www.elmundo.es/cultura/literatura/2021/07/10/60e83bab21efa0cc3c8b45de.html>
33. https://www.facebook.com/ejercitodelperuoficial?locale=es_LA
34. <https://www.miraflores.gob.pe/miraflores-a-30-anos-de-la-captura-del-cabecilla-terrorista-senderista-abimael-guzman/>
35. https://es.pngtree.com/freepng/stressed-office-worker-struggles-with-project-deadline-fatigue-anxiety-vector_12877338.html
36. <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/19775582-dibujos-animados-profesional-agotamiento-ilustracion>
37. <https://www.drahumbert-psiquiatria.es/galeotes-y-galeas-el-estres-laboral/>
38. <https://www.elperuano.pe/noticia/157101-archivo-general-de-la-nacion-la-institucion-que-salvaguarda-los-documentos-del-peru>
39. <https://www.archivonacional.go.cr/index.php/institucional/content-component-4/archivo-historico>

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA



<http://www.ctscafe.pe>

Volumen IX- N° 27 Noviembre 2025

210

Contáctenos en nuestro correo electrónico

revistactscafe@ctscafe.pe

Página Web:

<http://ctscafe.pe>

