

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

Andrea Carolina Minniti, Departamento de Química Industrial y Aplicada, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, aminniti6@gmail.com

Magdalena Viglione Lara, Departamento de Química Industrial y Aplicada, FCEfyN,, Universidad Nacional de Córdoba, magdaviglione@gmail.com

Pablo Daniel Ribotta, Departamento de Química Industrial y Aplicada, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, ICYTAC (Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba), UNC-CONICET, pribotta@agro.unc.edu.ar

Marcela Lilian Martínez, Departamento de Química Industrial y Aplicada, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, IMBIV, Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal, UNC-CONICET, marcelamartinez78@hotmail.com

María Cecilia Penci, Departamento de Química Industrial y Aplicada, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, ICYTAC (Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba), UNC-CONICET, cpenci@gmail.com

Renato Daniel Gili, ICYTAC (Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba), UNC-CONICET, renatogili@agro.unc.edu.ar

Resumen— Con el objeto de describir adecuadamente el comportamiento del secado en lecho fluidizado de los frutos del árbol *Ligustrum lucidum* se modeló el proceso a partir de ecuaciones de balances de materia y energía y pruebas experimentales. Tanto el volumen como la densidad de los frutos presentaron buen ajuste a funciones empíricas tipo cuadráticas. Se encontró que existe una contracción volumétrica y una disminución de la densidad de los granos conforme aumenta el tiempo de secado. Dado que las características físicas y geométricas de los granos presentan variaciones durante el tratamiento, se realizó un estudio de la fluidodinámica del lecho en estado fijo y fluidizado, para determinar la velocidad de mínima fluidización (v_{mf}) y la velocidad operativa de fluidización (v_{op}) durante el tratamiento térmico. Las curvas de secado se ajustaron a un modelo matemático propuesto por Midilli et al. ($T50^{\circ}\text{C}$ $R^2= 0,993$; $T60^{\circ}\text{C}$ $R^2= 0,996$; $T80^{\circ}\text{C}$ $R^2= 0,997$) y se calcularon los parámetros cinéticos. Mediante la ley de Fick, se encontró el valor de la difusividad efectiva de agua ($T50^{\circ}\text{C}$, $D_{ef} = 8,5 \times 10^{-11}$ m^2/s ; $T60^{\circ}\text{C}$, $D_{ef} = 1,52 \times 10^{-10}$ m^2/s ; $T80^{\circ}\text{C}$, $D_{ef} = 3,35 \times 10^{-10}$ m^2/s). Los resultados obtenidos experimentalmente se compararon con aquellos obtenidos de la simulación del proceso, siendo estos satisfactorios. Finalmente, el modelo empírico desarrollado se comparó con un modelo teórico, y se concluyó que el primero presenta un mejor ajuste a los datos experimentales.

Palabras clave: *Ligustrum lucidum*, cinética de secado, contracción volumétrica, lecho fluidizado.

1. Introducción

El secado es la operación a través de la cual se eliminan sustancias volátiles de un material mediante procesos térmicos, con el fin de reducir el contenido residual de estas sustancias hasta valores aceptablemente bajos [1]. Entre las principales razones por las cuales se desea secar un material se encuentran: obtener productos sólidos de fácil manipulación,

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

mejorar su preservación y almacenamiento, lograr la calidad del producto deseada y cambiar o mantener las propiedades reológicas del producto. En el caso de materiales vegetales, generalmente el compuesto volátil que se desea eliminar es el agua. Existen diversos métodos: por convección de aire caliente, por aporte de energía por fuente radiante, por conducción a través de una superficie caliente, etc., como así también numerosos equipamientos. Entre las tecnologías muy utilizadas para materiales vegetales, el lecho fluidizado adquiere relevancia. El aire calefaccionado es forzado a través de un lecho de sólidos, que se expande y se mantiene en suspensión [2]. Además, mediante la fluidización de las partículas se logra un excelente contacto entre el sólido y el aire, que se traduce en elevados coeficientes de transferencia de calor y altas velocidades de transferencia de materia. Así, la fluidización es una técnica muy ventajosa para el secado de granos y material vegetal en general. La transferencia de calor en los lechos fluidizados involucra mecanismos de conducción, convección y radiación, dependiendo de las condiciones operativas. Las contribuciones de los mecanismos de transferencia de calor a los coeficientes de transferencia de masa dependen de las dimensiones de las partículas, las condiciones de flujo, regímenes de fluidización, temperatura de operación y presión. En general se necesitan modelos, es decir, un conjunto de ecuaciones que conecten todos los parámetros del proceso con un conjunto de restricciones en forma de desigualdades, describiendo adecuadamente el comportamiento de todo el Sistema [3]. El secado de material vegetal es un proceso complejo ya que involucra fenómenos simultáneos de transferencia de materia y energía que ocurren en el interior de la partícula [4,5]. Se consideró el secado de los frutos del árbol *Ligustrum lucidum* (conocido como “siempreverde”), y se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados de la simulación del proceso mediante el uso del modelo. Sus frutos (semillas) contienen sistemas enzimáticos que funcionan eficientemente como biocatalizadores para la reducción de acetofenona a (S)-1-feniletanol, intermediario sustancial en la industria farmacéutica [5]. Este método de biorreducción permite obtener fenilalcoholes quirales con una muy buena enantioselectividad usando una metodología que es más amigable con el medio ambiente que la reducción clásica de cetonas proquirales. Para facilitar la separación de la semilla del resto del fruto es necesario eliminar en gran medida el contenido de agua presente en la pulpa del mismo. De esta manera, se logra tener una estructura más rígida y fácil de separar. El objetivo general de este trabajo fue desarrollar un modelo matemático que permita simular la operación de secado a escala piloto de frutos vegetales de tamaño esférico uniforme mediante la tecnología de lecho fluidizado.

2. Materiales y Métodos

2.1 Material vegetal

Frutos de *Ligustrum lucidum* fueron recolectados de ejemplares ubicados en Ciudad Universitaria, Córdoba. El material fue conservado a 8 °C hasta su utilización. Se tomaron muestras de cada lote de frutos seleccionados.

2.2 Secador de lecho fluidizado

Se utilizó un secador de lecho fluidizado Armfield FT31-A. Para la medición de la temperatura se colocaron dos sondas tipo K (Termocupla Testo®) y para la temperatura final del material se utilizó un termómetro infrarrojo FLUKE 59 mini (FLUKE ®).

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

2.3 Caracterización física y geométrica de los frutos

En los frutos se determinaron los siguientes parámetros: Diámetro esférico equivalente (d_e), Diámetro efectivo (d_p), Esfericidad (Φ_s). El volumen (V_i) y la densidad (ρ_i) de los frutos se determinó por picnometría utilizando glicerina. Todas las determinaciones de masa se realizaron en una balanza analítica OHAUS ($\pm 0,0001$ g). La esfericidad (Φ_s) y el diámetro efectivo de las partículas (d_p) se determinó mediante un análisis de imágenes a través de un software de dominio público llamado ImageJ versión 1.51f. Cada fotografía se procesó (binarización) utilizando el software a partir de la imagen binaria y se midieron las siguientes propiedades: área proyectada de partícula, longitud mayor L_1 y longitud menor L_2 . La densidad de lecho fijo (ρ_{LF}) se determinó según el siguiente procedimiento: se pesó cada muestra en una balanza analítica (OHAUS, $\pm 0,01$ g) y luego se la colocó en la cámara de secado. A efectos de normalizar el empaque del lecho, el ventilador se encendió para alcanzar el estado fluido, y luego se apagó para recuperar la condición estática posteriormente se registró la altura alcanzada y mediante la geometría de la cámara de secado y la altura del lecho se determinó el volumen del mismo para luego obtener la densidad del lecho en cada caso. La porosidad del lecho fijo ϵ se calculó a partir de los datos de densidad de partícula obtenidos por picnometría y los datos de la densidad del lecho [6].

2.4 Caracterización fluidodinámica del material vegetal

El estudio de los parámetros fluidodinámicos se llevó a cabo con las muestras de frutos secados durante distintos intervalos de tiempo. Se utilizó un anemómetro digital (Fluke® 923, $\pm 0,01$ m/s), con el cual se midió la velocidad del aire antes de ingresar a la cámara de secado para distintas posiciones del controlador. La caída de presión en el lecho ($\Delta P/L$) fue determinada a partir de mediciones de ΔP en función de la velocidad de aire de secado a 25 °C. Para ello se utilizó un sensor de presión diferencial (PASCOS® PS 2017 $\pm 0,1$ kPa). En cada ensayo se midió también la altura del lecho (L) con el objeto de determinar la porosidad y densidad del lecho en cada punto. Posteriormente se determinó la velocidad de mínima fluidización [1,7].

2.5 Curvas de secado

Aproximadamente 2 g de frutos se colocaron en cápsulas y se secaron en estufa a 90 °C hasta peso constante. Se determinó el contenido de humedad en base húmeda y en base seca. A partir de los datos de humedad en cada punto se calculó la humedad adimensional:

$$X_{ad} = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Donde X es el contenido de humedad b.s. en cualquier momento del secado (kg de agua/kg de sólido seco); X_e es el contenido de humedad de equilibrio (kg de agua/kg de sólido seco); X_0 es el contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de sólido seco).

2.6 Modelado matemático

Se utilizaron los ajustes matemáticos de los parámetros físicos, geométricos y fluidodinámicos (modelos experimentales) los balances correspondientes de materia y energía (modelo teórico). Las suposiciones fueron las siguientes [1,7, 8]:

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

- 1) Las pérdidas de calor en el lecho fluidizado son despreciables frente a la transferencia de aire-fruto.
- 2) Los términos de acumulación en las ecuaciones de balance del aire son despreciables frente a los correspondientes términos convectivos.
- 3) El mezclado de aire y frutos dentro del lecho es perfecto.
- 4) Debido a la suposición 3, la temperatura de salida del aire puede aproximarse igual a la temperatura del lecho.
- 5) Debido a la suposición 3, la velocidad de secado en el lecho ($-dW/dt$) representa al total del lecho, al igual que la variación de temperatura del producto (dT/dt).
- 6) La distribución de velocidad del aire en la sección transversal del lecho es uniforme.
- 7) La evolución de la temperatura de los frutos del lecho en el tiempo dependerá de la pérdida de temperatura del aire en su paso por el lecho, y de la demanda de calor debida a la evaporación de agua en el fruto.

Se compararon los ajustes obtenidos mediante el modelo experimental con los resultados de la simulación mediante un modelo teórico, desarrollado en una rutina de MatLab®.

3. Resultados y Discusión

3.1 Caracterización física y geométrica del material vegetal

En la tabla 1 se muestra, para cada tratamiento térmico, el volumen, densidad y diámetro equivalente de los frutos de *L. lucidum* secados por distintos intervalos de tiempo. Se observa a las tres temperaturas de secado que, en general, todos los parámetros físicos disminuyen a medida que progresa el secado. Por otro lado, los resultados obtenidos evidencian que el tamaño de los frutos de *L. lucidum* no es uniforme; se observa que el volumen inicial (V_0) y del diámetro equivalente para las muestras secadas a distintas temperaturas es diferente. Para realizar el secado se utilizaron distintos lotes, y el tamaño de las muestras varía según el árbol del que fueron extraídas. Debido a esto, para analizar la contracción volumétrica y lograr comparar dicho fenómeno entre los distintos tratamientos, se utilizó la relación de volumen V/V_0 adimensional. En la figura 1 se encuentran graficados los valores de V/V_0 obtenidos por picnometría de los frutos secados a 80 °C, 60 °C o 50 °C en función de X/X_0 , junto con sus respectivos desvíos estándar. Dicho error se le adjudica al método experimental utilizado para la determinación.

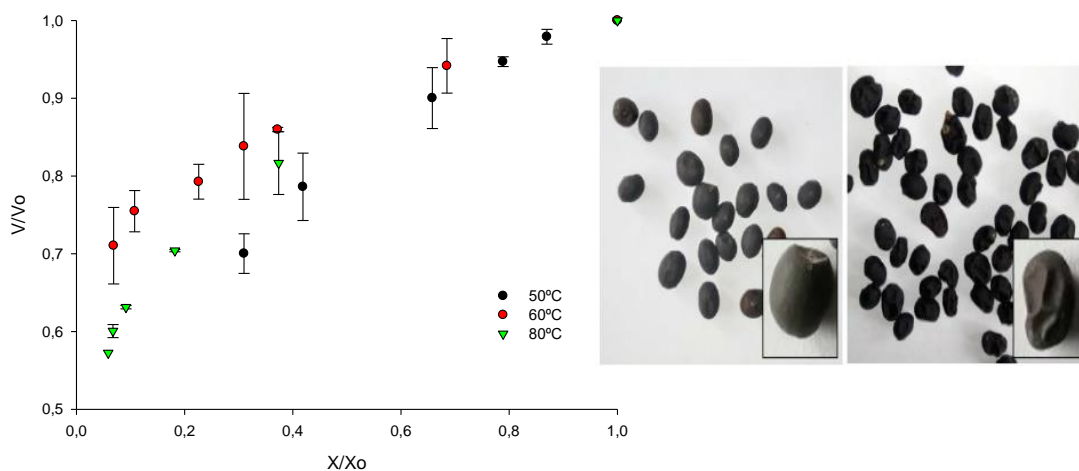


Figura 1. V/V_0 en función del contenido de humedad adimensional para las muestras secadas a 50 °C, 60 °C y 80 °C. Aspecto de los frutos sin (izquierda) y con (derecha) tratamiento de secado. Elaboración propia.

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

Tabla 1. Parámetros físicos de los frutos de *L. lucidum* secados a 50, 60 y 80°C.

Temperatura	Tiempo (h)	X (kg agua/kg sólidos secos)	ρ (g/cm ³)	V (cm ³)	de (cm)
50 °C	0	1,631 ±0,133	0,942 ±0,008	0,126 ±0,003	0,622 ±0,005
	0,5	1,425 ±0,042	0,938 ±0,000	0,123 ±0,001	0,618 ±0,002
	1	1,292 ±0,004	0,851 ±0,002	0,119 ±0,001	0,611 ±0,001
	1,5	1,078 ±0,044	0,758 ±0,044	0,113 ±0,005	0,601 ±0,009
	2,5	0,686 ±0,033	0,609 ±0,008	0,099 ±0,005	0,574 ±0,011
	3,5	0,508 ±0,065	0,692 ±0,008	0,088 ±0,003	0,553 ±0,007
	4,5	0,450 ±0,020	0,604 ±0,007	0,090 ±0,004	0,567 ±0,008
60 °C	0	1,621 ±0,006	0,928 ±0,032	0,117 ±0,009	0,608 ±0,016
	0,5	1,132 ±0,009	0,863 ±0,000	0,111 ±0,004	0,596 ±0,007
	1,5	0,615 ±0,032	0,697 ±0,017	0,101 ±0,000	0,578 ±0,001
	2	0,512 ±0,026	0,667 ±0,000	0,098 ±0,008	0,562 ±0,016
	2,5	0,374 ±0,006	0,676 ±0,095	0,093 ±0,003	0,563 ±0,005
	3,5	0,178 ±0,001	0,595 ±0,041	0,089 ±0,003	0,554 ±0,006
	4,6	0,114 ±0,002	0,553 ±0,023	0,083 ±0,006	0,542 ±0,013
80 °C	0	1,607 ±0,025	0,832 ±0,014	0,141 ±0,001	0,645 ±0,002
	0,5	0,601 ±0,003	0,790 ±0,003	0,115 ±0,006	0,603 ±0,010
	1	0,292 ±0,003	0,622 ±0,021	0,099 ±0,000	0,574 ±0,000
	1,5	0,147 ±0,008	0,643 ±0,005	0,089 ±0,000	0,554 ±0,001
	2	0,109 ±0,008	0,635 ±0,003	0,084 ±0,001	0,544 ±0,003
	2,5	0,095 ±0,002	0,618 ±0,000	0,080 ±0,000	0,536 ±0,000

Elaboración propia

Los modelos que presentaron mejor ajuste para el volumen resultaron el modelo cúbico y el cuadrático cuyos parámetros se presentan en la Tabla 2. Se seleccionó al modelo experimental cuadrático para describir el cambio de volumen de los frutos en función del contenido de humedad (Tabla 3) por resultar menos complejo. De igual manera se evaluó la relación entre la densidad y el contenido de humedad (X), y se seleccionó un modelo cuadrático ya que presentó el menor error estándar de predicción:

$$\begin{array}{lll}
 50\text{ °C} & R^2 = 0,985 & \rho = 0,195 + 0,006X - 1,35 \times 10^{-5} X^2 \\
 60\text{ °C} & R^2 = 0,989 & \rho = 0,523 + 0,589 X - 0,179 X^2 \\
 80\text{ °C} & R^2 = 0,999 & \rho = 0,580 + 0,745X - 0,493 X^2
 \end{array}$$

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

Tabla 2. Parámetros de los modelos cúbico y cuadrático del ajuste matemático de los datos experimentales de volumen de frutos.

Modelo	T	y ₀	a	b	c
$\frac{V}{V_0} = y_0 + a \frac{X}{X_0} + b \left(\frac{X}{X_0}\right)^2 + c \left(\frac{X}{X_0}\right)^3$	50 °C	0,373	1,352	-1,026	0,304
	60 °C	0,675	0,670	-0,552	0,206
	80 °C	0,502	1,254	-1,069	0,316
$\frac{V}{V_0} = y_0 + a \frac{X}{X_0} + b \left(\frac{X}{X_0}\right)^2$	50 °C	0,444	0,972	-0,416	-
	60 °C	0,687	0,543	-0,232	-
	80 °C	0,513	1,068	-0,584	-

Elaboración propia

Tabla 3. Ecuaciones de cambio de volumen de frutos de *L. lucidum* en función del contenido de humedad durante el secado

Temperatura	R ²	Ecuación
50 °C	0,998	$\frac{V}{V_0} = 0,444 + 0,972 \frac{X}{X_0} - 0,416 \left(\frac{X}{X_0}\right)^2$
60 °C	0,992	$\frac{V}{V_0} = 0,687 + 0,543 \frac{X}{X_0} - 0,232 \left(\frac{X}{X_0}\right)^2$
80 °C	0,980	$\frac{V}{V_0} = 0,513 + 1,068 \frac{X}{X_0} - 0,584 \left(\frac{X}{X_0}\right)^2$

Elaboración propia

La tabla 4 muestra la caracterización geométrica para cada muestra de frutos secados a 60 °C. Puede observarse que el diámetro disminuye a medida que avanza el proceso de secado.

Tabla 4. Caracterización geométrica del material vegetal.

X (kg agua/kg sól. secos)	d _i (mm)	d _m (mm)	Φ _s	d _e (cm)
1,6526	6,757 ±0,4556	6,7566 ±0,4556	0,810	0,6826
1,1317	6,679 ±0,5019	6,6794 ±0,5019	0,797	0,5964
0,6147	6,546 ±0,4111	6,5459 ±0,4111	0,781	0,5786
0,5117	6,310 ±0,3546	6,3099 ±0,3546	0,793	0,5623
0,3737	6,210 ±0,5091	6,2097 ±0,5091	0,822	0,5631
0,1777	5,999 ±0,4374	6,0032 ±0,4348	0,851	0,5540
0,1135	5,964 ±0,4303	5,9643 ±0,4303	0,828	0,5428

Elaboración propia

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

Los valores de densidad del lecho fijo y su porosidad para las distintas muestras se compilan en la Tabla 5. En los resultados se observa que la densidad del lecho disminuye a medida que progresa el secado. Esto significa que, para muestras de igual masa, pero contenido de humedad decreciente, el volumen del lecho fijo (es decir, la suma del volumen de partículas y de los espacios vacíos) será mayor para la muestra de menor contenido de humedad. En términos generales, tanto la porosidad del lecho como su densidad y la de partícula disminuyeron, y puede concluirse que, en proporción, la reducción de la densidad del lecho es mayor a la reducción de la densidad del fruto.

Tabla 5. Valores de densidad y porosidad de lecho fijo en función del contenido de humedad.

X (kg agua/kg sól. secos)	ρ_{LF} (g/cm ³)	ϵ
1,621	0,605	0,299
1,132	0,541	0,373
0,869	0,537	0,229
0,615	0,508	0,239
0,512	0,471	0,304
0,374	0,469	0,213
0,178	0,420	0,242

Elaboración propia

3.2 Caracterización fluidodinámica del material vegetal

Un lecho fluidizado convencional se forma a partir del paso de una corriente de gas (generalmente aire) a través de un lecho de partículas sólidas. Cuando la velocidad del gas es baja, el lecho está estático, los sólidos permanecen empaquetados sobre la malla metálica y el aire atraviesa el lecho de manera uniforme. A medida que se incrementa la velocidad del fluido, la caída de presión en el lecho aumenta, pero las partículas no se mueven y la altura del lecho permanece invariable. Existe una cierta velocidad a la cual la corriente de gas soporta el peso completo del lecho, y éste se fluidiza [1,2,7]. Este estado se conoce como de mínima fluidización y la velocidad del gas correspondiente se denomina velocidad mínima de fluidización (v_{mf}). A partir de una gran cantidad de datos experimentales de flujo a través de lechos de sólidos granulares Ergun propuso la siguiente relación con los valores de 150 para K_1 y 1,75 para K_2 , respectivamente [1]:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu}{d_p^2} \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} v_0 + 1,75 \frac{\rho}{d_p} \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} v_0^2 \quad (2)$$

Con el objetivo de determinar los parámetros K_1 y K_2 de la ecuación (2) que describe la caída de presión en el lecho de frutos de *L. lucidum*, se realizaron mediciones de ΔP a través del lecho en función de la velocidad de aire de secado a 25 °C para cada una de las muestras. En la figura 2 se observa el comportamiento de los frutos a diferentes tiempos de secado. A bajas velocidades de aire la caída de presión aumenta a medida que aumenta la velocidad del aire, con una pendiente creciente (zona lecho fijo). A mayor velocidad de aire, la pendiente decrece y la caída de presión (ΔP) se mantiene aproximadamente constante. Se observa que ΔP para las muestras con menor contenido de humedad se

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

estabiliza a velocidades de aire menores que para las muestras de mayor contenido de humedad. Esto es esperable ya que la masa por unidad de altura del lecho es menor, con lo que la velocidad que requiere el aire para igualar la masa del lecho y comenzar la fluidización es también menor.

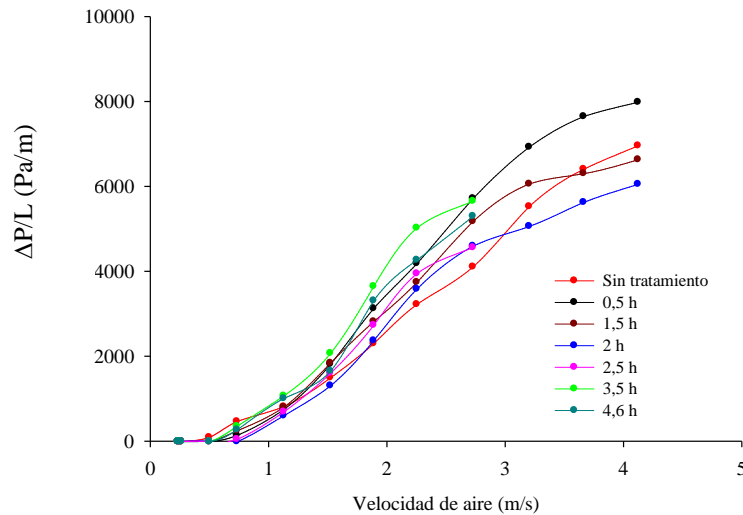


Figura 2. Caída de presión a través del lecho por unidad de altura de lecho en función de la velocidad de aire de secado (25°C) para todas las muestras. Elaboración Propia

Se realizó el ajuste de los datos a una ecuación polinómica de segundo grado y los resultados junto a los valores calculados de K_1 y K_2 se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Ajuste matemático para zonas de lecho fijo en curvas de caída de presión por unidad de altura de lecho en función de la velocidad del aire de secado.

Tiempo (h)	Ecuación	R ²	Error Std	K ₁	K ₂
0	$\frac{\Delta P}{L} = 334,49 v^2 + 764,53 v - 356,02$	0,997	114,7	52,16	0,049
0,5	$\frac{\Delta P}{L} = 407,74 v^2 + 1476,9 v - 1259,6$	0,996	167,9	242,64	0,133
1,5	$\frac{\Delta P}{L} = 439,82 v^2 + 964,12 v - 663,75$	0,997	111,8	22,05	0,026
2	$\frac{\Delta P}{L} = 348,83 v^2 + 1203,5 v - 1142,3$	0,992	116,3	31,21	0,023
2,5	$\frac{\Delta P}{L} = 778,14 v^2 + 237,3 v - 550,09$	0,999	38,30	16,30	0,122
3,5	$\frac{\Delta P}{L} = 1052,3 v^2 + 3,575 v - 246,79$	0,997	118,6	0,069	0,051
4,6	$\frac{\Delta P}{L} = 849,75 v^2 + 171,38 v - 312,13$	0,985	282,5	4,71	0,059

Elaboración propia

Los valores encontrados de K_1 y K_2 difieren significativamente a los valores encontrados por Ergun [1]. Esto puede deberse a que el rango de porosidad para el presente trabajo (0,21-0,37) es inferior al rango de estudio de Ergun (0,35 – 0,6). Se han reportado ensayos

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

con varios cereales como arroz, trigo, cebada y maíz para obtener los valores de K_1 y K_2 por ajuste. En dicho trabajo, determinaron valores desde 242 a 867 para K_1 y desde 3,17 a 6,54 para K_2 , los cuales son mucho más altos que los encontrados por Ergun [7]. Atribuyeron estas diferencias a la rugosidad de la superficie de cada cereal y, además a la variación de las propiedades del medio en las distintas direcciones (anisotropía), característica de los lechos formados por partículas de forma irregular. Por otro lado, Torrez Irigoyen [8] obtuvo en sus investigaciones para granos de soja valores de K_2 menores que los correspondientes a los Ergun y atribuyó estas diferencias al carácter liso o ablandamiento del tegumento húmedo del grano de soja. Los frutos de *L. lucidum* presentan similares características y pueden justificar del mismo modo las diferencias entre los valores de Ergun (1953) y los presentados en la tabla 6. Se realizó el cálculo de la v_{mf} mediante los datos obtenidos previamente y se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de v_{mf} para las muestras secadas a 60 °C.

Tiempo (h)	X bs	v_{mf} (m/s)
0	1,6527	3,384
0,5	1,1318	2,226
1,5	0,6148	2,462
2	0,5118	2,429
2,5	0,3737	2,275
3,5	0,1777	2,088
4,6	0,1135	2,102

Elaboración propia

La velocidad mínima de fluidización v_{mf} disminuye a medida que aumenta el tiempo de secado, es decir, conforme el contenido de agua del material disminuye. Por lo tanto, el caudal de aire necesario para fluidizar el lecho es menor. A los fines de incorporar en el modelo los cambios de velocidad operativa en el tiempo, se realizó el ajuste matemático de los datos experimentales, de manera de obtener una ecuación que describa el cambio de velocidad mínima de fluidización en función del tiempo. La función que mejor ajustó fue una ecuación exponencial de tres parámetros:

$$v_{mf} = 2,02 + 1,3618 e^{-0,6857 t} \quad (3)$$

En la figura 3 se muestra la curva ajustada y se observa que los datos experimentales difieren ligeramente de los predichos por el modelo. Sin embargo, dicho modelo es lo suficientemente satisfactorio como para establecer un punto de partida para el cálculo de la velocidad operativa.

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

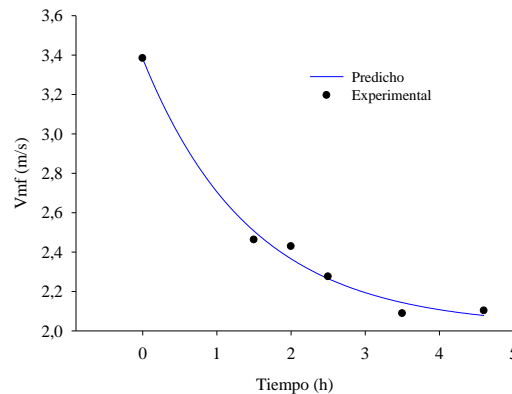


Figura 3. Ajuste de los datos de v_{mf} en función del tiempo. Curva predicha vs. Experimental. Los parámetros $a=1,361 \pm 0,087$, $b=0,685 \pm 0,109$ fueron determinados con un R^2 0,991. Elaboración propia.

3.3 Curvas de secado

Se estudió la cinética de secado de frutos de *L. lucidum* con el objetivo de seleccionar los modelos matemáticos más adecuados para interpretar los fenómenos de transferencia de materia y energía que tienen lugar durante el tratamiento y luego poder incluirlos en un algoritmo de simulación. El modelo teórico más ampliamente estudiado es la segunda ley de Fick para la difusión [1]. Los modelos semiempíricos más utilizados derivan de la simplificación o modificación de este modelo teórico, entre los que se pueden mencionar los modelos de Newton, Page, Henderson y Pabis, Verna et. al y Midilli-Kucuk [1,7,8]. La ventaja de usar modelos semiempíricos para describir las curvas de secado radica en que requieren menor tiempo para su desarrollo comparado con los modelos teóricos de capa delgada y no se necesitan realizar suposiciones de geometría, difusividad y conductividad. La desventaja es que son válidos únicamente en los rangos de temperatura, humedad relativa y velocidad y contenido de humedad del aire para los cuales fueron desarrollados. En la figura 4 se presentan los valores de contenido de humedad X_{ad} (adimensional) en función del tiempo para cada temperatura de tratamiento

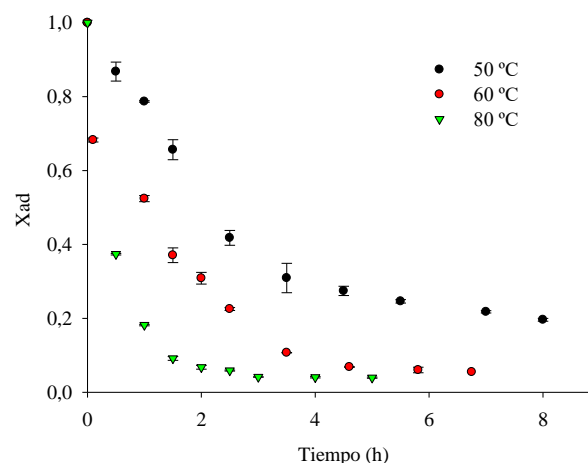


Figura 4. Curvas de secado experimental a 50, 60 y 80 °C. Elaboración propia

El tiempo de secado disminuye al aumentar la temperatura de tratamiento, esto es, a una mayor temperatura se necesita menos tiempo de secado para llegar a un mismo contenido de humedad que a una temperatura menor. Esta disminución en el tiempo de secado con

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

el aumento de la temperatura se debe a que aumenta la presión de vapor en el fruto, lo cual causa la eliminación más rápida de la humedad desde el interior hasta el exterior del fruto. Los resultados del ajuste de los datos experimentales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultado matemático del ajuste de las curvas de secado.

Modelo	Temperatura	R ²	Error STD
Logarítmico $X_{ad} = a e^{(-kt)} + c$	50 °C	0,986	0,040
	60 °C	0,997	0,019
	80 °C	0,999	0,009
Henderson y Pabis $X_{ad} = a e^{(-kt)}$	50 °C	0,975	0,050
	60 °C	0,994	0,026
	80 °C	0,987	0,038
Midilli <i>et al.</i> $X_{ad} = a e^{(-kt^n)} + bt$	50 °C	0,993	0,042
	60 °C	0,996	0,038
	80 °C	0,997	0,028
Page $X_{ad} = e^{(-kt^n)}$	50 °C	0,963	0,080
	60 °C	0,988	0,056
	80 °C	0,967	0,076
Dos términos $X_{ad} = a e^{(-k_0t)} + b e^{(-k_1t)}$	50 °C	0,986	0,044
	60 °C	0,997	0,021
	80 °C	1,000	0,007

Elaboración propia

Si bien todos los modelos presentan ajuste adecuado (coeficientes de determinación R² mayores a 0,96), se descartaron los modelos de Page y de Henderson y Pabis, debido a que presentan el menor R² para todas las temperaturas y el mayor error estándar. Para seleccionar entre los tres modelos restantes, se calculó el error medio relativo entre los valores experimentales. El modelo que presenta el menor error medio relativo es el de Midilli *et al.*, por lo que se lo seleccionó para modelar las curvas de secado para el intervalo de temperaturas estudiado (figura 5). La determinación del coeficiente de difusión efectivo se realizó utilizando los datos experimentales de humedad adimensional en función del tiempo de secado y se obtuvo el valor de la difusividad efectiva para cada una de las temperaturas de tratamiento. Los valores para 50, 60 y 80 °C resultaron 8,5x10⁻¹¹, 1,52x10⁻¹⁰ y 3,35x10⁻¹⁰ m²/s respectivamente. Los resultados están dentro del rango de 10⁻⁹ – 10⁻¹¹ para alimentos y materiales agrícolas [1,6,]. Por otro lado, dichos coeficientes concuerdan con los valores encontrados por otros autores para soja [8] y arvejas [4,5]. Se observa que al aumentar la temperatura de secado de 50 a 80 °C, manteniendo constante el resto de las variables, el coeficiente presenta un incremento de un orden de magnitud. Cuando la temperatura aumenta, el agua difunde con mayor facilidad ya que aumenta la energía cinética de sus moléculas, favoreciendo el proceso de secado.

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

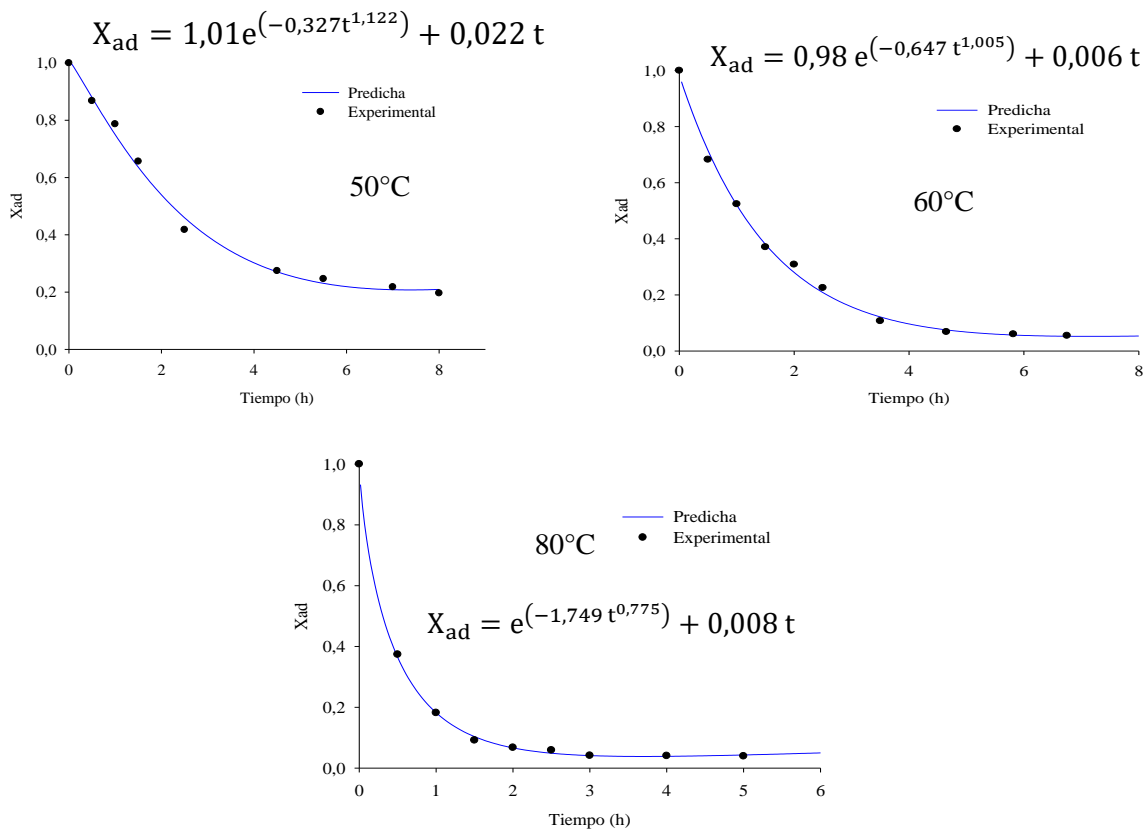


Figura 5. Curvas de secado ajustadas para el modelo de Midilli *et al.* para 50 °C, 60 °C y 80 °C. Elaboración propia.

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor efectivo aire-frutos h_T durante el secado para cada temperatura de tratamiento se evaluó a través de la temperatura superficial del fruto en función del tiempo de secado, el coeficiente de difusividad y la humedad de equilibrio. Además, se asignaron los valores determinados para el radio de partícula, humedad inicial, densidad del sólido, capacidad calorífica del fruto y calor latente de vaporización del agua. Los valores de h_T obtenidos mediante MatLab se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Coeficiente de transferencia de calor efectivo aire-frutos para cada temperatura de tratamiento.

Temperatura	h_T (W/°C m ²)	Error STD
50 °C	55,09	1,99
60 °C	141,87	0,78
80 °C	96,54	1,28

Elaboración propia

Los resultados obtenidos presentan el mismo orden de magnitud que los publicados por Torrez Irigoyen [6,8] en sus estudios de secado-tostado de soja, quien atribuye dichos valores se al alto grado de mezclado y agitación experimentado por las partículas. Teniendo en cuenta las características físicas y geométricas del fruto, del comportamiento fluidodinámico del lecho y de la cinética de secado se obtuvieron las ecuaciones que definen el comportamiento de las variables correspondientes. Se utilizó un modelo

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

matemático [6,8] capaz de predecir la evolución de cuatro variables fundamentales del secado: humedad del fruto (X), temperatura del fruto (T_f), temperatura del aire a la salida (T_{a2}) y humedad absoluta del aire a la salida (h_{a2}), en función del tiempo según los supuestos mencionados en la sección Materiales y Métodos. A continuación, se muestran los gráficos de las curvas de secado obtenidos a través del modelo experimental (valores predichos) y los datos medidos (Figura 6, parte izquierda) y los obtenidos mediante el modelo matemático teórico (Matlab®) (Figura 6, parte derecha).

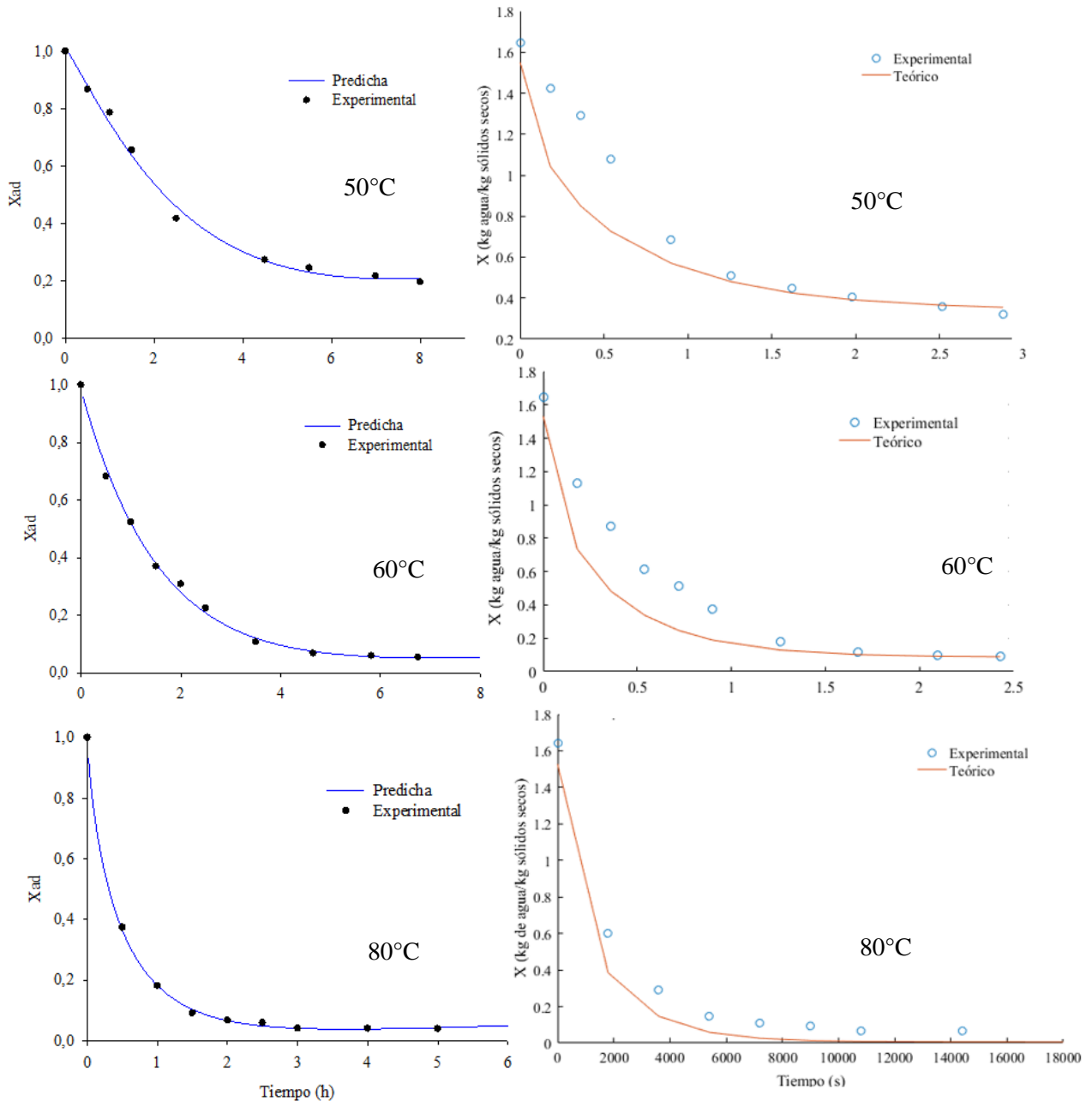


Figura 6. Comparación entre modelos experimentales (izquierda) y teórico (derecha).

Elaboración propia.

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

Las diferencias entre los modelos experimentales y el modelo teórico pueden atribuirse a que este último no considera factores como el encogimiento y el cambio de densidad que experimentan los frutos a lo largo del secado. Esto se evidencia en tiempos de secado cortos, es decir, para elevados contenidos de humedad en el fruto. Se determinó que el coeficiente de difusión efectivo tiene gran influencia en el valor calculado de humedad, lo cual afecta en gran medida al modelo teórico ya que éste contempla el error de determinación del coeficiente de difusión.

4. Conclusiones

Se realizó la caracterización (geométrica y fluidodinámica) de los frutos de *L. lucidum* encontrando que existe contracción volumétrica y reducción de densidad de los frutos para todas las temperaturas de tratamiento. El contenido de humedad se reduce exponencialmente con el tiempo de secado según comportamiento típico de materiales vegetales. Respecto del proceso de secado, los valores de coeficiente de difusión efectivo y energía de activación encontrados coinciden con los valores encontrados en bibliografía para materiales de características similares. El modelo teórico desarrollado presenta buen ajuste para bajos contenidos de humedad. Además, si se conocen los parámetros inherentes a la materia prima, podría utilizarse el modelo desarrollado para predecir parámetros del proceso de secado, lo cual permite obtener un mayor conocimiento de los fenómenos que suceden a lo largo del mismo y tener un punto de partida para la optimización de dicha operación. La simulación del modelo teórico en el software presenta la ventaja que puede ser utilizada por aquellos usuarios que no estén familiarizados con esta operación o como punto de partida para el modelado de otros equipos de secado en lecho fluidizado u otras matrices. Los resultados obtenidos resultan de gran utilidad en el proceso de secado del fruto para su conservación y posterior utilización de la semilla de *L. lucidum* mediante procesos sustentables (Green Chemistry) como fuente de catalizadores biológicos en reacciones de reducción de acetofenona a (S)-1-feniletanol, un intermediario clave para la producción de diversos fármacos.

Referencias

- [1] MUJUMDAR, A.S., 2015. Handbook of Industrial Drying Handbook of Industrial Drying. S.l.: s.n. ISBN 1574446681.
- [2] MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. 2001 Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta edición. 2001. Pág. 174, 175, 190.
- [3] PANTOJA, D.C., OSORIO, O. y MEJÍA, D.F., 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum* L.). Parte 1 : Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña Processing of Peas (*Pisum sativum* L.). Part 1 : Modelling of the Thin Layer Drying Kinetic of Pea, vol. 27, no. 1, pp. 69-80. DOI 10.4067/S0718-07642016000100009.
- [4] PANTOJA, D.C., OSORIO, O., MEJÍA, D.F. y VÁQUIRO, H.A., 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum* L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. Información Tecnológica, vol. 27, no. 1, pp. 69-80. ISSN 07180764. DOI 10.4067/S0718-07642016000100009.
- [5] AIMAR, M.L., N, D.L.B.Ó., FORMICA, S.M., CANTERO, J., VAZQUEZ, A.N.A.M., VELASCO, M.I. y ROSSI, L.I., 2014. Fruits of the glossy privet (*Ligustrum*

Modelado y simulación de la operación de secado de material vegetal (*Ligustrum lucidum*) mediante la tecnología de lecho fluidizado

lucidum — Oleaceae) as biocatalysts for producing chiral aromatic alcohols. , no. October, pp. 348-357. DOI 10.3109/10242422.2014.976634.

[6] IRIGOYEN, R.M.T. y GINER, S.A., 2011. Volume and density of whole soybean products during hot-air thermal treatment in fluidised bed. *Journal of Food Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 224-232. ISSN 02608774. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2010.08.023.

[7] FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L. y ANDERSEN, B., 2006. *Principios de operaciones unitarias*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796. Pág. 634-637.

[8] TORREZ IRIGOYEN, R. M. Diseño de un proceso térmico de fluidización para la producción de soja crocante. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2013.