

ARTÍCULO ORIGINAL

Estudio de los parámetros cinéticos en el secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*)

Study of the kinetic
parameters in the drying
of the shell of tuna
(*Opuntia ficus indica*)

Daphne H. Castro Arata^{1a*}, Kristy Otero Nole^{1b} y Edwin Llamoca Domínguez^{1c}

¹Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica Agroindustrial Moquegua (CITE Agroindustrial Moquegua), Instituto Tecnológico de la Producción (ITP), Moquegua, Perú

^adcastro@itp.gob.pe, ^bkotero@itp.gob.pe, ^cllamoca27@gmail.com,

* Autor de correspondencia

Resumen

El secado incluye dos procesos fundamentales un proceso de transferencia de calor que permite la evaporación del líquido, y la transferencia de masa que permite la difusión del líquido del alimento. El objetivo consiste en determinar los parámetros cinéticos del secado en la cáscara de tuna mediante una estufa a las temperaturas de 50°C, 65°C y 80°C. La cáscara de tuna fue sometida en una estufa Mermert para un secado por convección a temperaturas de 50°C, 65°C y 80°C en tiempo de 0 a 340 minutos, las cáscaras de tuna trozadas de 2cm x 2cm con espesor de 0.05cm acondicionados en placas petri. Los valores de difusividad fueron de $4.000 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $5.300 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.000 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a las temperaturas de 50°C, 65°C y 80°C respectivamente obteniendo una energía de activación $E = 19.419 \text{ KJ/mol}$ para un valor de $R^2 = 0.994$.

Palabras clave: difusividad térmica, humedad, secado, cinética

Abstract

Drying includes two fundamental processes: a heat transfer process that allows the evaporation of the liquid, and the mass transfer that allows the diffusion of the liquid from the food. The objective is to determine the kinetic parameters of drying

in the prickly pear peel by means of an oven at temperatures of 50° C, 65° C and 80° C . The peel of prickly pear that was subjected in a Mermert oven for drying by convection at temperatures of 50° C, 65° C and 80° C in time from 0 to 340 minutes, the peels of prickly pear were subjected to cuts of 2cm x2 cm with a thickness of 0.05cm conditioned in a petri dish. The diffusivity values were $4,000 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$, $5,300 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$, $4,000 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ at temperatures of 50 ° C, 65 ° C and 80 ° C respectively, obtaining an activation energy $E = 19.419 \text{ KJ} / \text{mol}$ for a value of $R^2 = 0.994$.

Keywords: thermal diffusivity, humidity, drying, kinetics

Introducción

La tuna es un fruto americano que se encuentra adaptado en todo el territorio peruano desde altitudes del nivel del mar hasta en los valles interandinos, encontrado bajo condiciones adecuadas para su establecimiento. Sus frutos son consumidos de forma natural tanto por campesinos como pobladores locales, y son comercializados en los principales mercados del país, es uno de los sistemas agro-pastoriles más importante de los andes peruanos. (Novoa, 2006).

La cáscara de tuna es una biomasa constituida por material lignocelulósico, es la parte no comestible del fruto, que durante la floración el crecimiento de esta cáscara es mayor que el de la pulpa del fruto, por lo que a peso menor del fruto, la calidad del fruto será mejor, situación que luego se revierte y el lóculo empieza a expandirse (Puente, et al. 2014).

Según Carhumaca (2013) ,menciona que la cáscara de la tuna contiene gran cantidad de ácidos grasos poliinsaturados y antioxidantes naturales como la vitamina E, tocoferoles y la vitamina C.

Actualmente debido al incremento de residuos orgánicos como la cáscara de frutos derivados de procesos agroindustriales que no son aprovechadas sirven como ingredientes funcionales que presentan un alto contenido de fibra, celulosa, lignina, entre otros. Por lo que conlleva a buscar nuevas formas o métodos que permitan darle un valor agregado a la cáscara de tuna como el secado de la cáscara para la extracción de celulosa por métodos químicos (Chaparro et al. 2020).

El proceso de deshidratación de alimentos es un proceso simultaneo de transferencia de calor y masa entre el producto y el aire de secado el cual consiste en la remoción de humedad excesiva contenida en el producto por medio de la evaporación, generalmente por convección forzada (Montes et al., 2008).

El secado de alimentos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos: la transferencia de calor, que permite la evaporación del líquido, y la transferencia masa, que permite la difusión del líquido dentro del sólido y del vapor de la superficie al ambiente (Suarez et. al., 2016). La reducción del agua que contienen los alimentos (Humedad del alimento) es uno de los métodos más antiguos utilizados de conservación, al disminuir el contenido de agua en los alimentos disminuyen los riesgos del deterioro biológico y otros mecanismos asociados a él. (Muñoz Muñoz y Cabrera, 2006).

El método de secado por convección en alimentos reduce la cantidad de agua e incrementa el tiempo de vida útil de un gran número de alimentos con humedades superiores al 80%, como es el caso de las hortalizas y frutas.(Alvarado Bawab, 2017).

Suarez et al., (2016) mencionan que los factores que regulan las velocidades del proceso de la rapidez o el índice de secado del contenido de humedad con respecto al tiempo (dX/dt) y así poder calcular la velocidad de secado:

Ecuaciones:

$$X = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$N_w = \frac{W_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde X representa el contenido de humedad (gramos humedad/ gramos solido seco), W del peso solido húmedo, W_s el peso solido seco, N_w la velocidad de secado (masa/ tiempo x área), y A área de la superficie expuesta al secado.

La mayoría de los modelos utilizados en los fenómenos de transportes aplicado a la ingeniería alimentaria de los alimentos se basan en las leyes de difusión de Fick y sus ecuaciones diferenciales en transferencia de energía, masa y entre otros (López et. al, 2019).

Material y métodos

El presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del laboratorio de fisicoquímica del CITE Agroindustrial Moquegua de la provincia de Ilo, distrito de Ilo del departamento de Moquegua, por lo que se utilizó cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*) en estado fresco, de la variedad blanca en su madurez fisiológica de calibre 7 cm \pm 5% de largo diámetro de 5 cm \pm 5%, obtenido del distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto del departamento de Moquegua. Inicialmente las muestras fueron sometidas a tratamientos previos de preparación como: selección y clasificación, lavado y desinfección, corte y pesaje. Se estableció el peso seco constante de las muestras con el método de

secado por estufa por convección a diferentes temperaturas, donde se realizaron dos corridas con cinco repeticiones.

Cinética del secado

Para determinar la cinética de secado se realizaron corridas experimentales a diferentes temperaturas de 50, 65 y 80 °C, por lo que se seleccionaron cáscaras de tunas de la variedad blanca, desinfectadas con solución de hipoclorito (100 ppm), realizando un corte de 2cm x 2cm con espesor de 0,05 cm y se acondicionaron las muestras en placas Petri correctamente rotuladas para ser sometidas a secado por convección de manera aleatoria.

Parámetros cinéticos de Secado

Construcción de las curvas de secado

Se analizaron el peso de todas las muestras del secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*) a diferentes temperaturas de 50, 65 y 80 °C, ajustando las condiciones de trabajo (humedad, temperatura y velocidad del aire), se procedió a tomar las dimensiones y peso de la placa Petri.

Cabe resaltar que durante el proceso de secado las muestras fueron pesadas a intervalos de 5 minutos por una hora y luego cada 10 minutos hasta obtener el peso constante, realizándose el mismo procedimiento para cada tratamiento.

Con el fin de determinar el modelo matemático describe el comportamiento cinético de secado, se evaluó el ajuste de los datos experimentales a modelos matemáticos, escogiendo el mejor modelo que se ajusta a los datos experimentalmente.

Cuadro 1

Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado

Nombre	Ecuación
Newton	$MR = \text{Exp}(-kt)$
Page	$MR = \text{Exp}(-kt^n)$
Page Modificado	$MR = \text{Exp}[(-kt)^n]$
Henderson y Pabis	$MR = a[\text{Exp}(-kt)]$
Logarítmico	$MR = a[\text{Exp}(-kt)] + c$
Thomson	$MR = 1 + at + bt^2 \quad t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$
Difusión	$MR = a[\text{Exp}(-kt)] + (1-a)[\text{Exp}(-kbt)]$

Fuente: (Montes et al., 2008)

Del cuadro 1 los cálculos partirán con el modelo de Newton, el cual está relacionado con los cambios de humedad y el secado y esté ligado con la segunda de Fick.

Modelo matemático de la Determinación de la Difusividad Efectiva

En el procedimiento del secado presenta, generalmente, un breve periodo de velocidad constante y posteriormente, se produce un periodo de velocidad decreciente, donde el factor que controla es la difusión (López-Mejía et al., 2019; Ocampo, 2006).

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente fueron modeladas utilizándose los modelos de difusividad de Fick.

El modelo de secado para la mayoría de los materiales se basa en la ecuación de Fick, expresada con una dimensión por la ecuación. (Giraldo-Zuniga et al., 2010)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

X=contenido de humedad libre de la cáscara de tuna

t= tiempo (h)

x=dimensiones características (m)

D_{ef}= coeficiente de difusión efectivo (m²s⁻¹)

Por lo que se halló la difusividad térmica con la siguiente ecuación:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = H = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi D_{ef} t}{4l^2}\right] \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde H es un número adimensional que representa el contenido de humedad del sólido, X₀ es el contenido de humedad inicial en base seca; X_e es la humedad de equilibrio en base seca; t es el tiempo de secado y L es el espesor del material que se seca.

Mediante la regresión lineal, se obtienen los valores de los parámetros asociados con la mejor curva de ajuste, para los datos experimentales de humedad libre X. Las variables X y t presentan una dependencia de forma exponencial como se evidencia en la ecuación 5.

$$X = a \exp(-kt) \dots\dots (\text{ecuación 5})$$

Se realizó una transformación lineal, aplicando logaritmos para obtener una ecuación lineal:

$$\ln x = \ln a + (-kt) \dots\dots (\text{ecuación 6})$$

Por analogía a la ecuación de una recta y= A+Bx se tiene que:

$$Y = \ln(x); A = \ln(a), Bx = -kt, B = -k \text{ y } x = t \dots\dots\dots \text{(ecuación 7)}$$

Para el caso de las ecuaciones, se tiene que $a = \frac{8}{\pi^2}$ y $k = -\frac{\pi^2}{4L^2}$ Def. De la pendiente B de la recta del $\ln(x)$ contra tiempo, se tiene que el coeficiente de difusión Def es:

$$B = \frac{\pi^2}{4L^2} \text{ Def} \dots\dots\dots \text{(ecuación 8)}$$

Despejando se obtiene

$$\text{Def} = \frac{k \cdot 4L^2}{\pi^2} \dots\dots\dots \text{(ecuación 9)}$$

Para observar si existe influencia de temperatura de secado sobre la difusividad de agua desde el interior del producto hacia la superficie del mismo, se aplicó la ecuación de Arrhenius (ecuación 4) con la cual se puede obtener la energía de activación

$$\text{Def} = D \cdot \exp \frac{E_a}{RT} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 10)}$$

(E_a), que representa la energía para iniciar la reacción de difusión. (Vega., et al , 2007).

Donde Def es la difusividad efectiva de agua ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); D es el factor de Arrhenius ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_a es la energía de activación ($\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); T es la temperatura absoluta de secado (K) y R es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Resultados

La cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*) presento una humedad inicial promedio de 83.7% y se muestra el tiempo de secado y el %Humedad a las diferentes temperaturas trabajadas.

Tabla 1

Tiempo de secado y el (% Humedad) de la cáscara de tuna (Opuntia ficus-indica) para las temperaturas de 50°C, 65°C y 80°C

Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Humedad libre (%)
50	420	8.23
65	300	8.41
80	180	9.54

Los datos obtenidos de los análisis experimentales de las corridas realizadas fue posible evaluar la homogeneidad del proceso a través de la cámara de secado.

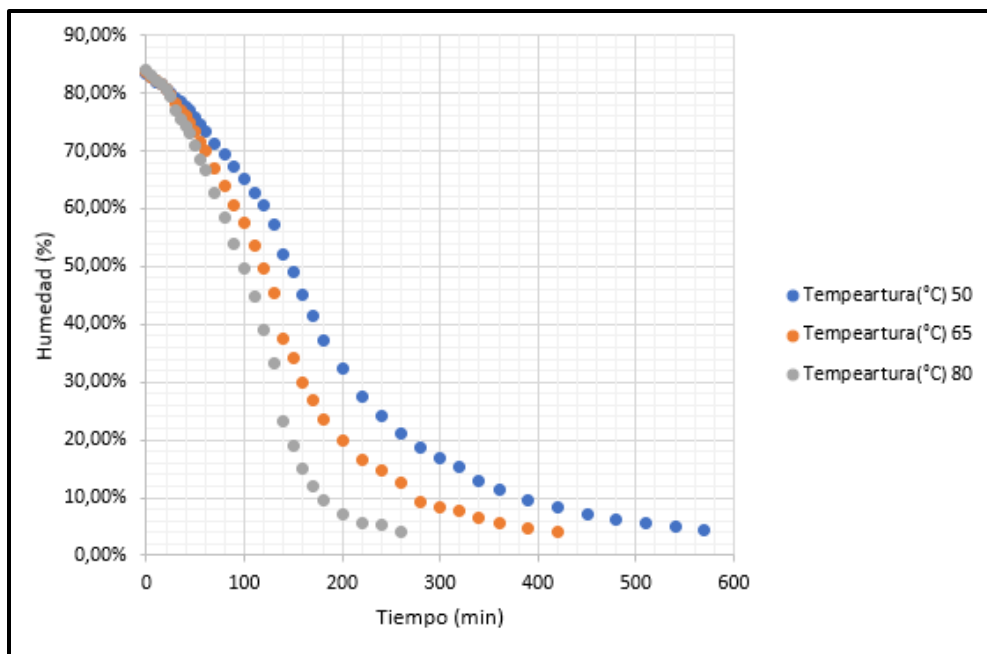
En la Figura 2 se presenta la pérdida de humedad de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) a través del tiempo para cada una de las temperaturas trabajadas en la estufa, por lo que se pudo observar el porcentaje de humedad de las cáscaras de tuna (*Opuntia ficus-indica*) versus el tiempo, en el cual la remoción de humedad se da de forma inmediata el cual se debe al calentamiento de la estufa se da en forma volumétrica, por lo que las moléculas polares contenidas en el material entran en contacto con la radiación de la estufa.

En el análisis realizado se observó que la remoción de humedad es homogénea a lo largo del tiempo y temperatura establecida y en las tres muestras de las diferentes temperaturas alcanza el mismo contenido de humedad final del producto.

La difusividad efectiva representa la facilidad con la que el agua se difunde en el medio que lo rodea y depende de la naturaleza del objeto que la contiene y del medio circundante; sin embargo esta se ve afectada principalmente por la temperatura, aparte de la presión (López-Mejía et al., 2019).

Figura 1

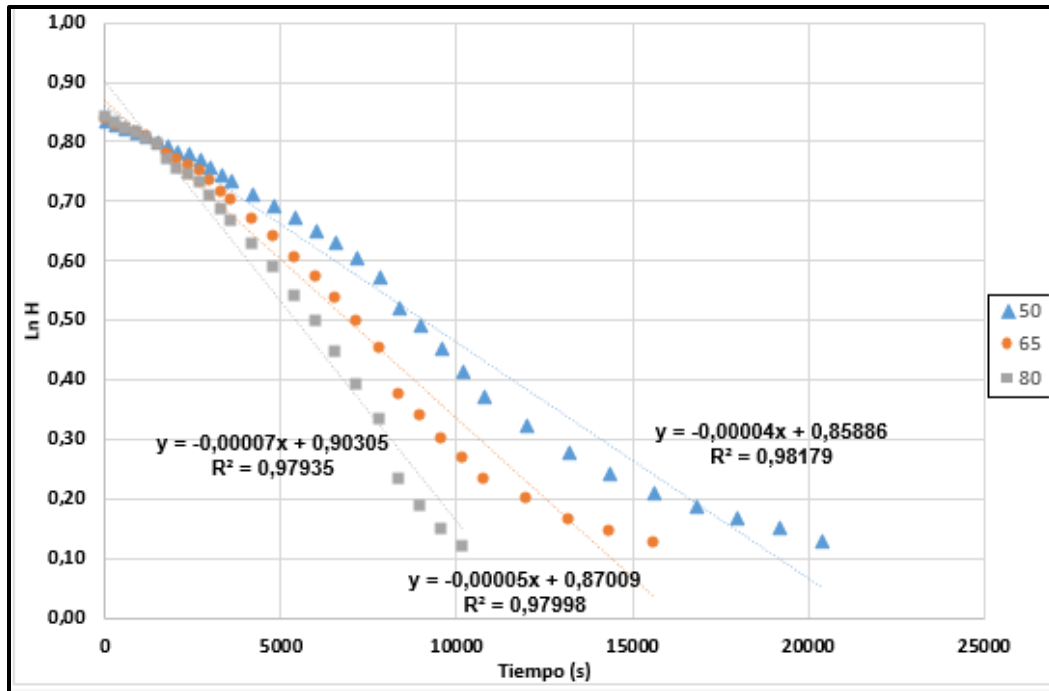
Variación del porcentaje de humedad de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) a Temperatura de 50°C, 65°C y 80°C.



Podemos observar en la Figura 1 que al incrementarse la temperatura se presenta una mayor pérdida de humedad en menos tiempo, por lo que se concluye que la mayor temperatura de aire implica mayor velocidad de secado.

Figura 2

Logaritmo Neperiano (MR)(adimensional) versus el tiempo de secado de la cáscara de tuna (Opuntia ficus-indica)



En la Figura 2 se evidencia la dependencia del MR con la temperatura, esto en medida que se incrementó la temperatura de secado incrementando su difusividad el cual se representa en el Tabla 2.

Tabla 2

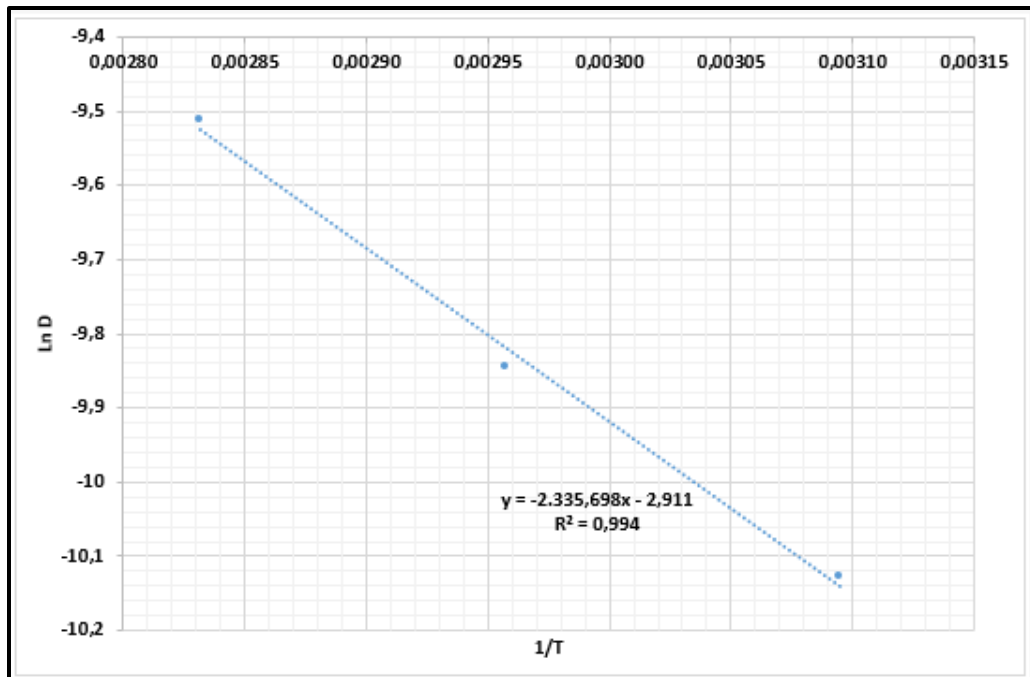
Difusividad efectiva a temperatura de 50°C, 65°C y 80°C.

Temperatura del aire (°C)	Difusividad (m ² /s)	1/T (1/K)	R ²
50	4.000x10 ⁻⁵	0.0031	0.982
65	5.300x10 ⁻⁵	0.0030	0.980
80	7.400x10 ⁻⁵	0.0028	0.980

Graficando los valores de la Tabla 2 se obtiene la Figura 3, donde se evidencia una linealidad entre los resultados con un R² de 0.994.

Figura 3

Grafica de Arrhenius para la Determinación de la Difusividad Efectiva



De la Figura 3, se determina la Energía de Activación mediante la pendiente de la recta de la gráfica de Arrhenius de y la difusividad de secado el cual se evidencia en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados de Parámetros cinéticos del secado de cáscara de tuna (Opuntia ficus-indica) según el Modelo Fick

E/R	E(KJ)/mol	LnDc ₀	D ₀ (m ² /s)	R ²
2335.698	19.419	-2.911	5.44x10 ⁻²	0.994

Discusión

En la Tabla 2 se presentan los distintos tratamientos, los promedios de los resultados obtenidos de la difusividad efectiva de 4.000x10⁻⁵m²/s, 5.300x10⁻⁵ m²/s, 7.400x10⁻⁵ m²/s a temperaturas de 50°C, 65°C y 80°C, respectivamente, evidenciando que la difusividad incrementa con en el efecto de la temperatura (Giraldo-Zuniga et al., 2010), asimismo Rojas (2007) reporto valores cercano con la cáscara de kiwi con un valor de 1,476 x10⁻⁵m²/s.

La difusividad efectiva representa la facilidad con que el agua se difunde en el medio que lo rodea y depende de la naturaleza del objeto que la contiene y del medio circundante; sin embargo esta se ve afectada principalmente por la temperatura, tipo de secado y la característica del producto alimenticio, aparte de la presión (López-Mejía et al., 2019).

El valor de la energía de activación depende de las condiciones de secado teniendo como resultado de las pruebas para la cascara de tuna un valor de 19.419 KJ/mol, valor cercano a la energía de activación en el secado del nopal con un valor de 28.21 KJ/mol (Martínez et. al 2010). Asimismo, Rizvi, (1995), reporto que las energías de activación para alimentos están en el rango de 15-50 KJ/mol lo que respaldan nuestros resultados.

En el presente estudio se obtuvo una humedad de 83.7% en la cáscara de tuna, este resultado se asemeja a la humedad reportada por Cereal y Duarte de 83.84%, que es superior de chaparro y cols. (2019) de 82.00% y Moreno y col (2008) de 77.60% e inferior a Yanira Terán y cols. (2015) con 88.62%.

Se obtuvo un valor de R^2 de 0.994 para el buen ajuste lineal para la determinación de los parámetros cinéticos según la Figura 3,

Conclusiones

Para las condiciones evaluadas, se concluye que a temperatura constante e incrementando la velocidad del aire de secado, los parámetros cinéticos X y c permanecen constantes.

Referencias bibliográficas

- Alvarado Bawab, M. B. (2017). Estudio del proceso de secado de fresa usando horno microondas/Study of the strawberry drying process using microwave dryer. *Prospectiva*. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.658>
- Carhuamaca Canto, A. (2013). Evaluación de efecto de sustención de la harina de cáscara de tuna (*Opuntia ficus*)
- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A. F., Silva, P. F., Valdes-Serra, J. C., & Pavlak, M. C. de M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000100027>
- Iglesias Díaz, R., Grimaldi Gutiérrez, R. V., Villanueva Galindo, B. E., Hernández Jarquín, J. M., López de Paz, P., & Lastres Danguillecourt, O. (2018). Cinética de secado de Moringa oleífera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1503>

- López-Mejía, N., Andrade-Mahecha, M. M., & Martínez-Correa, H. A. (2019). Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (Cucurbita moschata). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1151>
- Martínez Soto G., Flores Ortega A., Mercado Flores J., López Orozco M. (2010) Características de secado de nopal (Opuntia ficus-indica) por lecho fluidizado. Vol. 20 (3); 70-78. <https://www.redalyc.org/pdf/416/41618860010.pdf>
- Montes, E. J., Torres, R., Andrade, R. D., Pérez, O. A., Marimon, J. L., & Meza, I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (dioscorea rotundata) en capa delgada. *Ingeniería e Investigación*.
- Muñoz Muñoz, D., & Cabrera, G. (2006). Secado Directo E Indirecto De Piña. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*.
- Novoa, S. (2006). Sobre el origen de la tuna en el Perú: Algunos alcances. *Zonas Áridas*, 10(1), 174–181.
- Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA*. <https://doi.org/10.24050/reia.v3i5.153>
- Puente, L., Castro, E., & Jiménez, E. (2014). Obtención del mucilago de la cáscara de la tuna (Opuntia ficus-indica) a partir de diferentes métodos de extracción " Memoria para optar al título de Ingeniera en Alimentos. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130028/Obtencion-del-mucilago-de-la-cascara-de-la-tuna.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Suarez Hernandez L., Barrera Zapata R. & Forero Sandoval A. F. (2016) Evaluation of alternative drying techniques for the earthworm flour processing. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, Mosquera (Colombia), 17(1):55-71. <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v17n1/v17n1a06.pdf>
- Vega Gálvez, A., Tello Ireland, C., & Lemus Mondaca, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (gracilaria chilensis). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052007000100008>