

Estudio de la Cinética de Deshidratación de Uchuva (*Physalis peruviana L.*) en un Secador de Lecho Fluidizado

María A. Hincapié¹ y José E. Zapata^{1*}

(1) Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Dpto. de Alimentos, Univ. de Antioquia, Calle 70 # 52-21, Apartado aéreo AA1226, Medellín, Colombia. (e-mail: alejahs.3021@gmail.com; edgar.zapata@udea.edu.co)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Jun. 27, 2018; Aceptado Sep. 6, 2018; Versión final Oct. 30, 2018, Publicado Abr. 2019

Resumen

El objetivo de esta investigación fue estudiar la cinética de secado de la uchuva en un secador de lecho fluidizado, usando temperaturas de 60, 70 y 80°C, con velocidades de aire de 9.5 m/s. Se evaluó el efecto de la temperatura de secado sobre características del producto tales como pH, sólidos solubles (°Bx), acidez, humedad y color. Se estableció la cinética de pérdida de humedad, velocidad de secado y se obtuvo el coeficiente de difusión efectivo para cada temperatura de trabajo. Se ajustó una ecuación tipo Arrhenius para establecer la relación entre el coeficiente de difusión y la temperatura. Los resultados mostraron que el color de la uchuva se vio afectado principalmente por el tratamiento a 80°C. Además, los tiempos de secado para alcanzar un equilibrio fueron de 8, 5.5 y 5 horas para 60, 70 y 80°C respectivamente, con pérdidas de humedad de 92, 85 y 94%.

Palabras clave: lecho fluidizado; modelo de difusión; velocidad de aire; cinética de secado; *Physalis peruviana L.*

Study of the Dehydration Kinetics of Uchuva (*Physalis peruviana L.*) in a Fluidized Bed Dryer

Abstract

The objective of this research was to study the drying kinetics of cape gooseberries in a fluidized bed dryer, using temperatures of 60, 70 and 80°C, with air velocities of 9.5 m/s. The effects of the drying temperature on product characteristics such as pH, °Bx, acidity, humidity and color were evaluated. The kinetics of moisture loss and drying rate were established and the effective diffusion coefficient was obtained for each working temperature. An Arrhenius equation was fitted to establish the relationship between the diffusion coefficient and the temperature. The results showed that color of cape gooseberry was affected mainly for the treatment at 80°C. Additionally, the drying times to reach equilibrium were 8, 5.5 and 5 hours for 60, 70 and 80°C respectively, with moisture losses of 92, 85 and 94%.

Keywords: fluidized bed; diffusion model; velocity air; drying kinetics; *Physalis peruviana L.*

INTRODUCCIÓN

El fruto de uchuva, más conocido como *Physalis peruviana* L., es originario de la región de los Andes sudamericanos; pertenece a la familia de las solanáceas y crece en diferentes tipos de suelo con bajos requerimientos de fertilización (Luchese et al., 2015). Esta fruta es una baya esférica conocida popularmente por sus propiedades organolépticas (sabor, olor y color) (Vásquez-Parra et al., 2013), tiene un alto contenido de compuestos volátiles potenciadores de sabor como los 3-5-hidroxyesteres y otros hidroxiesteres glicoconjugados (Cortes et al., 2012). Además, posee un gran valor nutricional debido a la presencia de compuestos bioactivos, tales como el ácido ascórbico, compuestos fenólicos, fitoesteres y carotenoides (Luchese et al., 2015). Colombia es el principal productor y exportador de uchuva en el mundo debido principalmente a la calidad de su fruta en cuanto a color y alto contenido de azúcares (Vásquez-Parra et al., 2013). Las cifras de exportación han alcanzado aproximadamente las 11500 toneladas por año; sin embargo, los excesos de fruta que no se destinan a la exportación alcanzan un 50% del total de la producción (Puentes et al., 2011; Castro et al., 2008), cifra que no se comercializa por ser de menor tamaño (aproximadamente 5 g de peso) (Vásquez-Parra et al., 2013) y por su alto índice de perecibilidad, factor que dificulta la mercadotecnia internacional (Luchese et al., 2015). Aunque generalmente las frutas se comercializan como productos frescos, también se utilizan en salsas, jarabes, mermeladas o para nuevos productos deshidratados (Vásquez-Parra et al., 2013; Puentes et al., 2011).

Una de las alternativas más comúnmente utilizadas en la industria de alimentos para obtener productos deshidratados, es el secado convectivo, pues ofrece un proceso relativamente rápido, higiénico, uniforme (Vásquez-Parra et al., 2013) y disminuye gastos de embalaje, almacenamiento y transporte (Ateeque et al., 2014). Sin embargo, el elevado costo de los combustibles y la ineficiencia de algunos métodos de secado, ha conducido a utilizar procesos alternativos que permitan alcanzar las mejores condiciones en el producto (Ocampo, 2006). Los secadores de lecho fluidizado son algunos de los sistemas más utilizados en la industria, debido a que presentan ventajas en comparación con secadores de bandejas o de vacío rotativo (Srinivas et al., 2015), en ellos se imprimen velocidad suficiente a un lecho de partículas para dispersarlas y generar turbulencia que acelera la deshidratación (Sánchez-Ramírez et al., 2007). El lecho fluidizado ofrece excelentes tasas de transferencia de calor y masa gracias a su alto grado de mezcla, al igual que una distribución uniforme de la temperatura (Torrez Irigoyen y Giner, 2016; Jia et al., 2015) debido a que se genera un área superficial de contacto muy alta entre el gas y el sólido presente en el lecho (Srinivas et al., 2015), dando como resultado una reducción en el tiempo de proceso (Sánchez-Ramírez et al., 2007). Diversos autores han utilizado este método para secar alimentos tales como champiñones (Çakmak et al., 2016), cubos de zanahoria (Nazghelichi et al., 2010), café (Sánchez-Ramírez et al., 2007), soja (Torrez Irigoyen y Giner, 2016), entre otros.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de la temperatura sobre la cinética de secado, los coeficientes de difusión, las propiedades fisicoquímicas más importantes y el color de frutos de uchuva en un secador de lecho fluidizado.

METODOLOGÍA

La metodología presenta la caracterización de los frutos de uchuva, las diferentes determinaciones desarrolladas en el proceso de secado y la estrategia seguida para el modelamiento matemático.

Frutos de uchuva

Las uchucas frescas recolectadas fueron cultivadas en el municipio de La Unión, Antioquia, Colombia y escogidas cualitativamente por tamaño (2.5 cm de diámetro aproximadamente) y color, que de acuerdo al grado de madurez estaba entre 3 y 4 según la Norma Técnica Colombiana 4580 (ICONTEC, 1999). Tanto a las muestras frescas como al producto seco se les determinó por triplicado el porcentaje de humedad utilizando una estufa de aire forzado (Thermo Scientific, USA) según el método oficial AOAC 934.06 (AOAC, 2016), acidez titulable expresada como ácido cítrico por el método AOAC 942.15 (AOAC, 2016), °Bx con un refractómetro digital marca Atago, LR45227 (Milton Roy Company, USA); el pH se midió con ayuda de un pHmetro marca Laqua F-71G, modelo 9615 (Horiba Scientific, Japón); y finalmente, se hicieron mediciones de color con un espectrocolorímetro de esfera SP-60, (X-rite, USA) mediante el sistema CIELab con iluminante de referencia D65.

Secado

Se ubicaron 200g de uchuva fresca en un secador de lecho fluidizado a escala piloto (figura 1), el cual consta de dos resistencias eléctricas de 3000w cada una (1), un relé en estado sólido (2) y una termocupla tipo J para control de temperatura (3). El aire que circula es impulsado por un ventilador centrífugo de tres etapas (4) con un motor de 3 Hp (5) a través de un tubo de acrílico de 0.10 m de diámetro y 0.90 m de longitud (6).

Los tratamientos se realizaron a temperaturas de 60, 70 y 80°C y cada ensayo fue realizado por duplicado. El peso de la fruta se registró a intervalos de 30 min hasta alcanzar peso constante.

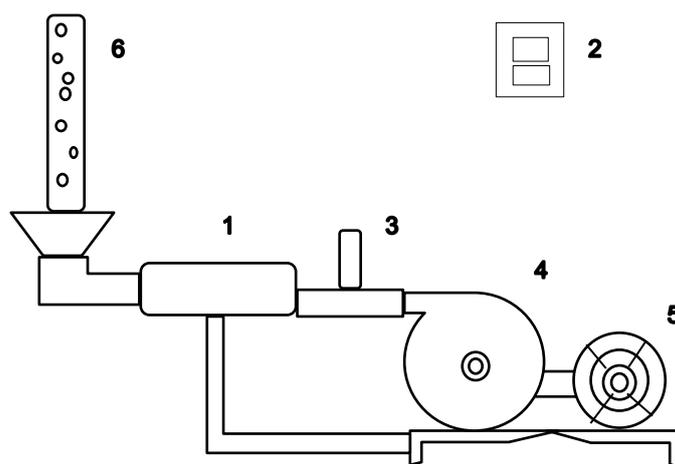


Fig. 1: Vista esquemática del secador de lecho fluidizado.

Velocidad y altura mínimas de fluidización

La velocidad mínima de fluidización corresponde a la mínima velocidad del aire que permite fluidizar todas las partículas en el sistema, a una temperatura determinada (Sánchez-Ramírez et al., 2007). La velocidad del aire para cada tratamiento se midió con un anemómetro digital marca PCE-AM81, (PCE Instruments, España); ubicado en la parte superior del tubo. Para determinar este parámetro se varió la velocidad del aire de 3 a 20 m/s y el valor mínimo se estableció en el momento en que los frutos de uchuva quedaban suspendidos en el aire y generaban una completa fluidización. Un parámetro adicional que se determinó fue la altura mínima de fluidización, la cual se estableció midiendo la altura del lecho en el momento en que todas las partículas alcanzaban la fluidización.

Modelamiento matemático del secado

El comportamiento de la humedad en función del tiempo se ajustó mediante la ecuación 1, la cual utiliza el dato de humedad experimental y el porcentaje de humedad predicho para el instante de tiempo correspondiente, obtenida a partir de un modelo de tipo sigmoideal (Ecuación 2), este modelo, utiliza parámetros adimensionales (a , b y w) además de un término de compensación (Offset), que hacen que la curva no crezca o decrezca desmesuradamente, por encima de ciertos valores del tiempo. Este tipo de modelos ya han sido utilizados como un método alternativo para el modelamiento de procesos termoquímicos complejos en un secador de lecho fluidizado, para evitar colisiones en los vehículos en movimiento, entre otros estudios (Pandey et al., 2016). El ajuste de se hizo utilizando el software Matlab 8.1.

$$H_p = \frac{(100 - y) * H_{exp}}{100} \quad (1)$$

$$y = \frac{a}{(1.0 + \exp(-\frac{t-b}{w})) + Offset} \quad (2)$$

Se evaluó la calidad del ajuste con el modelo propuesto, por medio del porcentaje de error medio relativo que se presenta en la ecuación 3 (Zapata et al., 2014):

$$\%E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \right) \quad (3)$$

Para determinar el coeficiente de difusión, se utilizó un modelo fenomenológico basado en la solución de la segunda ley de Fick (Ecuación 4), considerando la uchuva como una esfera uniforme, con difusión radial en estado no estacionario (Vega-Gálvez et al., 2014; Crank, 1975). En dicha ecuación puede considerarse únicamente el primer término de la sumatoria, asumiendo que los demás no son significativos (Ocampo, 2006), como aparece en la ecuación 5.

$$W_a = \frac{H_t - H_e}{H_o - H_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} * \exp \left[-j^2 \pi^2 D_{\text{eff}} \frac{t}{r^2} \right] \quad (4)$$

$$W_a = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\pi^2 D_{\text{eff}} \frac{t}{r^2} \right] \quad (5)$$

Posteriormente, se hizo un ajuste tipo Arrhenius para D_{eff} en función de la temperatura (Ecuación 6), la cual puede linealizarse como se muestra en la ecuación 7 (Castro et al., 2008; Ocampo, 2006).

$$D_{\text{eff}} = A * \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right] \quad (6)$$

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln A - \left(\frac{E_a}{R} \right) * \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se organizan en seis subsecciones: 1) Análisis físicos y fisicoquímicos; 2) Velocidad mínima de fluidización; 3) Contenido de humedad en el equilibrio; 4) Curva de Velocidad de secado; 5) Efecto del secado sobre las características de la uchuva y 6) Modelamiento del secado.

Análisis físicos y fisicoquímicos

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para los análisis fisicoquímicos en la uchuva fresca y en la uchuva deshidratada después de cada tratamiento. Se puede apreciar que los valores para la uchuva fresca corresponden con los establecidos por la NTC 4580 (ICONTEC, 1999) y con datos experimentales anteriormente reportados (Humberto et al., 2012; Puente et al., 2011; Castro et al., 2008).

Tabla 1: Análisis fisicoquímicos de los frutos de uchuva frescos y secos

Análisis	Uchuva fresca	Uchuva deshidratada		
		60°C	70°C	80°C
pH	3.6±0.00	3.3±0.11	3.2±0.10	3.2±0.06
°Bx	13.7±0.45	91.82±6.02	84.84±5.86	93.52±0.74
%Acidez	2.35±0.05	11.77±1.21	5.32±1.42	5.16±0.25
%Humedad	80.76±0.62	8.18±6.02	15.15±5.86	6.48±0.74

En cuanto al color, en la tabla 2 se presentan los parámetros de la uchuva fresca, como niveles de referencia del color característico del producto.

Tabla 2: Análisis de color de uchuva con el sistema CIELab

Parámetro	Uchuva fresca	Uchuva deshidratada		
		60°C	70°C	80°C
L*	62.03±1.53	51.04±1.15	49.64±0.08	39.17±1.29
a*	17.55±0.66	23.41±1.73	21.79±1.05	20.66±1.07
b*	50.77±1.18	44.23±0.57	47.23±1.67	31.55±0.32
C	53.62±1.28	50.06±1.17	51.97±0.92	37.72±0.85
H	0.33±0.002	0.47±0.03	0.43±0.04	0.58±0.02
ΔE*	--	12.32±2.16	13.02±0.33	29.35±1.73

Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización medida para cada temperatura se presenta en la figura 2, en la cual se observa que las velocidades mínimas en las que la altura del lecho empieza a incrementarse son 6, 8 y 9.5 m/s para 70, 60 y 80°C respectivamente. Por lo que se decidió trabajar todos los ensayos con una velocidad de 9.5 m/s para garantizar que a todas las temperaturas en estudio se tenga el lecho completamente fluidizado. Se tomó la altura correspondiente a la mínima velocidad de fluidización, ya que un aumento de la altura del lecho conduce a contenidos de humedad finales más altas en los productos, pues las condiciones y variaciones del aire en el lecho fluidizado influyen en el secado cuando existe un contacto directo con el alimento (Torrez Irigoyen y Giner, 2016).

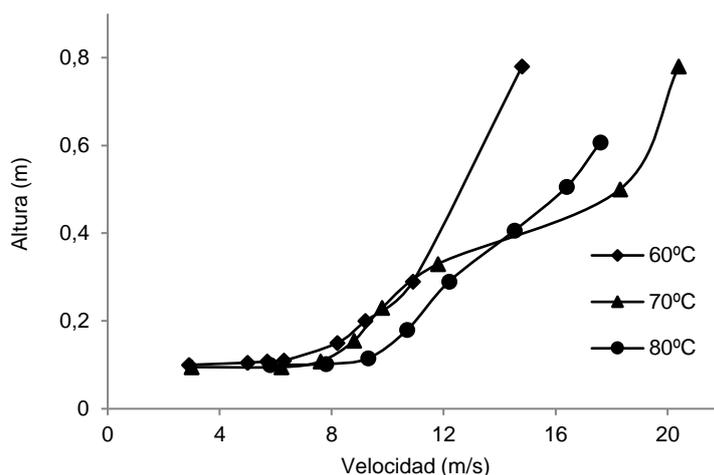


Fig. 2: Determinación de la velocidad mínima de fluidización.

Contenido de humedad en el equilibrio

La humedad inicial promedio de las muestras de uchuva fue del 81%. La figura 3 muestra los resultados experimentales (representados por los marcadores), obtenidos para la humedad en función del tiempo a las tres temperaturas de trabajo. La línea continua representa los valores de humedad predichos por los modelos que se ajustan más adelante.

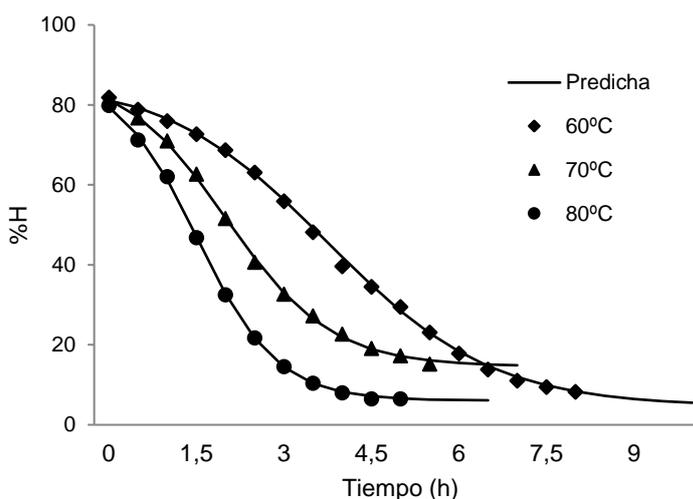


Fig. 3: Curva de secado de uchuva en lecho fluidizado como función del tiempo.

En las tres curvas se observa que para cada tratamiento la uchuva presenta una etapa de adaptación al inicio del proceso de secado, es decir, no disminuye de inmediato como ha ocurrido con otros procesos similares que se han reportado (Vega-Gálvez et al., 2014; Vásquez-Parra et al., 2013). Este comportamiento puede deberse a la alta solubilidad de los solutos presentes (Gabas et al., 2009) y a la complejidad de su microestructura que dificulta el intercambio de fluidos entre el interior y el exterior de la fruta (Puente et al., 2011).

Después de la adaptación, la pérdida de agua se va dando de manera más rápida, para al final, descender nuevamente, presentando un comportamiento asintótico con el valor de humedad de equilibrio. Esto se debe a que la uchuva presenta una superficie con baja permeabilidad al intercambio de fluido, además de una microestructura compleja que en ocasiones dificulta el proceso de secado con aire caliente, más aún si la temperatura no es muy elevada (Puente et al., 2011). Se determinó que los frutos de uchuva perdieron aproximadamente un 92% de humedad con el tratamiento a 60°C, 85% a 70°C y 94% a 80°C en un tiempo de 8, 5,5 y 5 horas respectivamente.

El tiempo que toma cada curva para acercarse al equilibrio es función de la temperatura y en general todas las curvas presentan forma sigmoideal. Por lo que los datos experimentales se ajustaron a una ecuación con la forma de la Ecuación 4, cuyos valores de los parámetros se presentan en la tabla 3, además de los valores %E.

Tabla 3: Valores de los parámetros H_o , H_e , %E y D_{eff} en función de la temperatura

	H_o	H_e	%E	D_{eff} (m ² /s)
60°C	81.80	4.60	1.83	1.12E-09
70°C	81.24	14.59	0.09	1.95E-09
80°C	79.85	6.06	1.43	2.69E-09

Es importante observar en la figura 3, como en el rango inferior de temperatura (60 y 70°C), la humedad de equilibrio aumenta con la temperatura, fenómeno que ha sido ampliamente estudiado en alimentos ricos en carbohidratos, tales como la remolacha (Iglesias et al., 1975) y el mango (OCAMPO, 2006). La uchuva por su parte, posee un alto contenido de carbohidratos (11.0 a 19.6%) y una actividad de agua de 0.998 (Humberto et al., 2012; Puente et al., 2011). La sacarosa es el azúcar mayoritario, seguida de glucosa y fructosa (Ruiz-cabrera y schmidt, 2015) y la temperatura de transición vítrea (T_g) de la sacarosa se encuentra entre 60 y 70°C (Ruiz-Cabrera y Schmidt, 2015), es decir, en este rango de temperaturas la estructura de la sacarosa pasa de cristalina a amorfa (Cedeño, 2009).

Este contenido de carbohidratos conjuntamente con la alta actividad acuosa, puede estar asociado a una mayor exposición de sitios activos a medida que incrementa la temperatura (Brett et al., 2009). Bajo tales condiciones, las moléculas en el estado cristalino pueden aproximarse a la región de transición vítrea y llegar a plastificarse, incrementando de esa forma su movilidad y disponibilidad para la adsorción de agua (Brett et al., 2009) ya que pueden exhibirse nuevos grupos funcionales como los OH, los cuales tienen gran facilidad para establecer puentes de hidrógeno con el agua y de esta forma mantener un nivel de hidratación mayor que el que se tenía a una temperatura menor (Badui, 2015). En el rango superior de temperatura (70 y 80°C) la humedad de equilibrio decrece con la temperatura, indicando que la uchuva pierde higroscopicidad, hecho que se puede atribuir a los mayores niveles de energía y baja estabilidad de las moléculas de agua a medida que la temperatura se incrementa, promoviendo su separación de los sitios de unión en la matriz alimentaria (Brett et al., 2009).

Curva de Velocidad de secado

La figura 4 muestra las velocidades de proceso de secado de la uchuva a diferentes temperaturas, para una masa inicial de 200 g y una velocidad de flujo de aire caliente de 9.5 m/s. Se observa que la velocidad de secado se incrementa con la temperatura.

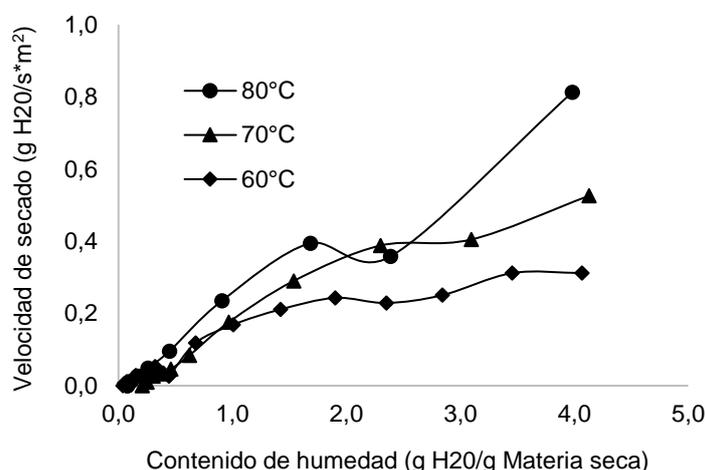


Fig. 4: Curva de Velocidad de secado para uchuva en lecho fluidizado.

Para las tres temperaturas, la curva de velocidad de secado (figura 4), señala básicamente dos etapas. Una primera que se aproxima a velocidad de secado constante, en la que la temperatura del alimento alcanzaría un valor de equilibrio, debido a que una capa de agua se forma en la superficie del producto y por tanto el secado se da como si el sólido no estuviera presente (Çakmak et al., 2016). La irregularidad de esta etapa indica que el proceso de secado de la uchuva está determinado principalmente por un proceso difusivo. En la siguiente etapa se consume la mayor parte del tiempo pues aquí comienza a deshidratarse la fruta, por lo que se presenta un periodo de velocidad decreciente debido a la difícil salida del agua a través del sólido (Montes Montes et al., 2008), lo cual ha sido atribuido a la baja permeabilidad de la piel del fruto (Vásquez-Parra et al., 2013). Este comportamiento concuerda con otros reportes de literatura en el mismo rango de temperatura para otros sustratos (Mahn et al., 2017; Çakmak et al., 2016; Montes Montes et al., 2008).

Efecto del secado sobre las características de la uchuva

En la tabla 1 se observa que los Bx° y el porcentaje de acidez aumentaron después de cada tratamiento, principalmente la acidez para el secado a 60°C. El color por su parte presentó cambios en los frutos deshidratados con respecto a la uchuva fresca (tabla 2). Se observó un descenso en el parámetro b* para todos los tratamientos, siendo mayor el descenso a 80°C, que indica una pérdida del color amarillo característico del fruto, posiblemente debido a la reacción de Maillard promovida por la mayor temperatura durante el proceso de secado (Cortés et al., 2015; Vásquez-Parra et al., 2013) combinado con el alto contenido de azúcares en la fruta (Humberto et al., 2012) y un posible pardeamiento enzimático (Cortés et al., 2015; Vásquez-Parra et al., 2013). A la temperatura de 70°C, se observa un menor descenso de b*, es decir, mayor tendencia al amarillo, posiblemente asociado a la alta retención de humedad.

Los valores de a* aumentan para las frutas procesadas con respecto a las frescas, lo que implica que el color rojo se pierde a medida que se incrementan los tiempos y temperaturas de secado, posiblemente porque la combinación de estos provoca la pérdida de carotenos (Castro et al., 2008), sin embargo, este efecto es menos intenso a medida que se reduce el tiempo de tratamiento a pesar de que las temperaturas sean mayores. En este aspecto, es favorable usar mayores temperaturas para reducir el tiempo en que se alcanza el equilibrio. Estos valores de a*, son similares a los obtenidos por Vásquez-Parra et al., 2013 para frutos de uchuva secados por convección forzada a 60°C. Así mismo, en la tabla 2 se observa que hay una disminución en la luminosidad (L*) del producto a medida que va aumentando la temperatura de secado dado el oscurecimiento de las muestras (Luchese et al., 2015), lo cual es un aspecto desfavorable para la apariencia del mismo. El aumento de temperatura también afectó la tonalidad y el croma de la fruta, pasando de 0.33 a 0.58 y de 53.62 a 37.72 respectivamente, a una temperatura de 80°C. En lo que respecta a la diferencia de color, las muestras mostraron una diferencia global detectable visualmente para todas las condiciones experimentales, ya que los valores están muy por encima de 3.0 (Luchese et al., 2015); sin embargo, nuevamente las muestras deshidratadas a 80°C arrojan valores de ΔE^* que indican una diferencia de color muy perceptible para el ojo humano respecto a la fruta fresca, por lo que este tratamiento altera considerablemente la apariencia general de la fruta.

Modelamiento del secado

La tabla 3 presenta los parámetros de la Ecuación 4 y los valores de los D_{eff} arrojados para cada una de las temperaturas. Se observa que el D_{eff} se incrementa con la temperatura debido a que las altas temperaturas de secado proporcionan mayor energía al producto y evaporan el agua más fácilmente (Nazghelichi et al., 2010). Los valores de D_{eff} obtenidos en el presente estudio son más altos que los obtenidos para esta misma fruta en deshidratación osmótica (Luchese et al., 2015) y en secado convectivo (Vega-Gálvez et al., 2014) en el mismo rango de temperaturas, mientras que están en el mismo orden de magnitud que productos con estructura más sencilla, como es el caso de la papa (1.32E-09 m²/s) (Della Roca, 2010).

Los valores de los D_{eff} se ajustaron con el inverso de la temperatura según como se muestra en la Ecuación 7, para establecer la energía de activación y el factor pre exponencial en el secado en lecho fluidizado del fruto de uchuva (figura 5), la cual entregó una energía de activación de 42.903 KJ·mol⁻¹ y un factor de frecuencia de 8.23·10⁻⁶. Este valor de energía de activación está en el mismo orden de magnitud que los reportados por Castro et al. (2008), el cual evaluó el secado de uchuva por aire caliente con y sin pretratamiento de osmodeshidratación, con valores de 45.815 KJ·mol⁻¹ y 49.041 KJ·mol⁻¹ respectivamente. Mientras que el factor pre exponencial obtenido está dos órdenes de magnitud por debajo del reportado por Vega-Gálvez et al. (2014) (5.53·10⁻⁴ m²/s) para secado convectivo de uchuva.

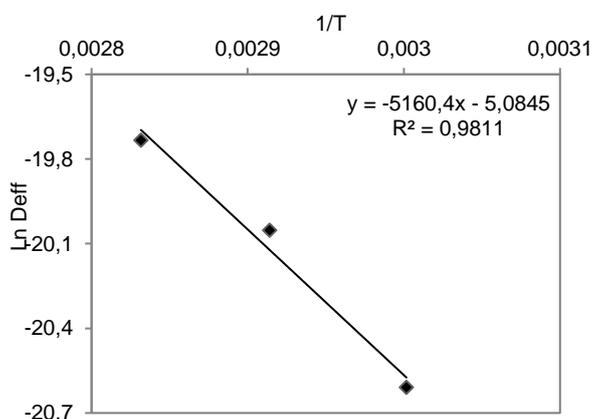


Fig. 5: Difusividad del agua en función de la temperatura

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) Las temperaturas del secado en lecho fluidizado de la uchuva, afectan parámetros como la velocidad mínima de fluidización, la velocidad de secado y el D_{eff} , además de las características fisicoquímicas y apariencia del producto seco; 2) El comportamiento cinético del proceso de secado puede ser descrito por medio de un modelo fenomenológico como el derivado de la solución de la segunda ley de Fick y el efecto de la temperatura sobre D_{eff} , se ajusta a una ecuación tipo Arrhenius. 3) Entre las temperaturas evaluadas, la más favorable para el secado de uchuva en lecho fluidizado es 60°C, dado que genera el menor efecto sobre las características del producto y obtiene humedades de equilibrio por debajo de las del secado a 70°C.

NOTACIÓN

Símbolos

Hp	Porcentaje de humedad predicha, %
Hexp	Porcentaje de humedad experimental, %
y	Porcentaje de pérdida de humedad predicha, %
a	Constante adimensional de la ecuación 2
b	Constante adimensional de la ecuación 2
w	Constante adimensional de la ecuación 2
Offset	Constante adimensional de la ecuación 2
t	Tiempo, s
n	Número de observaciones
%E	Porcentaje de error medio relativo, %
Xei	Contenido de humedad experimental, %
Xci	Contenido de humedad estimado por el modelo, %
Wa	Contenido de humedad adimensional
Ho	Porcentaje de humedad inicial, %
Ht	Porcentaje de humedad en el tiempo, %
He	Porcentaje de humedad en el equilibrio, %
π	Número Pi
D_{eff}	Coeficiente de difusión efectivo, m^2/s
r	Radio de la esfera, m
A	Factor pre exponencial, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Ea	Energía de activación, $\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
R	Constante universal de los gases, $8.314 \cdot 10^{-3} \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	Temperatura absoluta, K

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CODI de la Universidad de Antioquia por la financiación del trabajo a través de su estrategia de sostenibilidad.

REFERENCIAS

- AOAC, 934.06, Official Methods of Analysis, Moisture in Dried Fruits, 2940, Gaithersburg, Estados Unidos (2016)
- Ateeque, M., R. K. Mishra, V. P. Chandramohan y P. Talukdar, Numerical Modeling of Convective Drying of Food with Spatially Dependent Transfer Coefficient in a Turbulent Flow Field, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.12.003, Int. J. Therm. Sci, 78, 145–157 (2014)
- Badui, S., Química de los Alimentos, 5ª Ed., 1-716, Pearson Ed., Ciudad de México, México (2015)
- Brett, B., M. Figueroa y otros tres autores, Moisture Sorption Characteristics of Starchy Products: Oat Flour and Rice Flour, ISSN: 1557-1866, Food Biophys, 4(3), 151–157 (2009)
- Çakmak, R.S., O. Tekeoğlu y otros tres autores, Effects of Electrical and Sonication Pretreatments on the Drying Rate and Quality of Mushrooms, doi:10.1016/j.lwt.2016.01.032, LWT-Food Sci. Technol, 69, 197-202 (2016)
- Castro, A., L. Rodríguez y E. Vargas, Secado de Uchuva (*physalis peruviana* L) por Aire Caliente con Pretratamiento de Osmodeshidratación, ISSN: 0121-4004, Vitae, 15(2), 226–231 (2008)
- Cedeño, M., Determinación de la Temperatura Vítreo de Transición en Caramelos Duros, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería en mecánica y ciencias de la producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador (2009)

- Cortes, F.B., A. Betancourt y otros tres autores, Evaluación de las Propiedades Termodinámicas de Sorción de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.), ISSN: 1909-9959, *Revista de Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 10(1), 32–41 (2012)
- Cortés, M., E. Herrera y E. Rodríguez, Optimización Experimental del Proceso de Liofilización de Uchuva Adicionada con Componentes Activos por Impregnación al Vacío, doi: 10.17533/udea.vitae.v22n1a06, *Vitae*, 22(1), 47–56 (2015)
- Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, 2ª Ed., 44-68, Oxford University Press, London, UK (1975)
- Della Roca, P., *Secado de Alimentos por Metodos Combinados: Deshidratación Osmótica y Secado por Microondas y Aire Caliente*, Tesis de Maestría, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina (2010)
- Gabas, A.L., J. Telis-Romero, G.I. Giraldo-Gómez y V.R.N. Telis, Propiedades Termodinámicas de Sorción de Agua de la Pulpa de Lulo en Polvo con Encapsulantes, doi:10.1590/S0101-20612009000400032, *Ciencia Tecnol. Alime*, 29(4), 911–918 (2009)
- ICONTEC. NTC 4580. Frutas Frescas. Uchuva, Especificaciones, 5-6, Bogotá D.C., Colombia (1999)
- Iglesias, H., J. Chirife y J. Lombardi, Water Sorption Isotherms in Sugar Beet Root, doi:10.1111/j.1365-2621.1975.tb00033.x, *Int. J. Food Sci. Tech.*, 10(3), 299–308 (1975)
- Jia, D., O. Cathary y otros cinco autores, Fluidization and Drying of Biomass Particles in a Vibrating Fluidized Bed with Pulsed Gas Flow, doi:10.1016/j.fuproc.2015.06.023, *Fuel Process. Technol.*, 138, 471-482 (2015)
- Luchese, C.L., P.D. Gurak y L.D.F. Marczak, Osmotic Dehydration of *Physalis* (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of Water Loss and Sucrose Incorporation and the Quantification of Carotenoids, doi:10.1016/j.lwt.2015.04.060, *LWT-Food Sci. Technol.*, 63(2), 1128–1136 (2015)
- Mahn, A.V., C.E. Pérez y A.E. Reyes, Efecto de las Condiciones de Secado en Lecho Fluidizado Pulsante sobre el Contenido de Sulforafano de Brócoli, doi: 10.4067/S0718-07642017000400004, *Información Tecnológica*, 28(4), 17-28 (2017)
- Mendoza, J.H., A. Rodríguez y P. Millán, Caracterización físico química de la Uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca, ISSN: 1909-9959, *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 10(2), 188–196 (2012)
- Montes-Montes, E.J., R. Torres Gallo y otros cuatro autores, Modelling the Kinetics of Thin-Layer Yam (*dioscorea rotundata*) drying, ISSN: 0120-5609, *Ing. Invest*, 28(2), 45–52 (2008)
- Nazghelichi, T., M.H. Kianmehr y M. Aghbashlo, Thermodynamic Analysis of Fluidized Bed Drying of Carrot Cubes, doi:10.1016/j.energy.2010.09.036, *Energy*, 35(12), 4679–4684 (2010)
- Ocampo, A., Modelo Cinético del Secado de la Pulpa de Mango, ISSN: 1794-1237, *Revista EIA*, 3(5), 119-128 (2006)
- Pandey, D.S., S. Das y otros tres autores, Artificial Neural Network Based Modelling Approach for Municipal Solid Waste Gasification in a Fluidized Bed Reactor, doi:10.1016/j.wasman.2016.08.023, *Waste Manage*, 58 (diciembre), 202–213 (2016)
- Puente, L.A., C.A. Pinto-Muñoz, E.S. Castro y M. Cortés, *Physalis peruviana* Linnaeus, the Multiple Properties of a Highly Functional Fruit: A Review, doi:10.1016/j.foodres.2010.09.034, *Food Res. Int.*, 44(7), 1733–1740 (2011)
- Ruiz-Cabrera, M.A. y S.J. Schmidt, Determination of Glass Transition Temperatures During Cooling and Heating of Low-Moisture Amorphous Sugar Mixtures, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.023, *J. Food Eng.*, 146, 36–43 (2015)
- Sánchez-Ramírez, J., I. Anaya-Sosa y otros tres autores, Estudio de la Hidrodinámica del Café Tostado (*Coffea arabica* L.) en Lecho Fluidizado, ISSN: 1665-2738, *Rev. Mex. Ing. Quim.*, 6(2), 185–192 (2007)
- Srinivas, G., S.K. Thamida e Y.P. Setty, Simulation and validation of a model for a batch wall heated fluidized bed dryer, doi:10.1016/j.powtec.2014.10.011, *Powder Technol.*, 270, 368–377 (2015)
- Torrez Irigoyen, R.M. y S.A. Giner, Drying–Toasting of Presoaked Soybean in Fluidised Bed. Modeling, Validation and Simulation of Operational Variants for Reducing Energy Consumption, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.10.011, *Journal of Food Engineering*, 171, 78–86 (2016)
- Vásquez-Parra, J.E., C.I. Ochoa-Martínez y M. Bustos-Parra, Effect of Chemical and Physical Pretreatments on the Convective Drying of Cape Gooseberry Fruits (*Physalis peruviana*), doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.06.037, *J. Food Eng.*, 119(3), 648–654 (2013)
- Vega-Gálvez, A., L. Puente-Díaz y otros tres autores, Mathematical Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana*L), doi:10.1111/jfpp.12024, *J. Food Process. Pres.*, 38(2), 728–736 (2014)
- Zapata, J.E., O.A. Quintero y L.D. Porras, Isotermas de Adsorción para Hojuelas de Avena (*Avena sativa* L.), doi:10.15446/agron.colomb.v32n1.40652, *Agronomía Colombiana*, 32(1), 52–58 (2014)

