

Kinetic modelling of drying of three varieties of yucca industrial

Angélica María Torregroza-Espinosa ^a, Everaldo Joaquín Montes-Montes ^b, Adrián Enrique Ávila-Gómez ^c, & John Fredy Remolina-López ^d

^a Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Colombia. angite4@hotmail.com

^b Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Colombia. emontes@unicordoba.edu.co

^c Escuela de Ingenierías y Arquitectura, Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería, Colombia. adrian.avila@upbmonteria.edu.co

^d Escuela de Ingenierías y Arquitectura, Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería, Colombia. john.remolina@upbmonteria.edu.co

Received: September 16th, 2013. Received in revised form: June 18th, 2014. Accepted: June 27th, 2014.

Abstract

Drying of three varieties of cassava, was conducted in a tunnel type dryer; the effect of temperature, variety and velocity of drying air on the drying time, using a completely randomized design in factorial arrangement with three factors: temperature (45, 55 and 70°C), speed drying air (1, 3 and 4 m/s) and range (Corpoica Tai, Gines and Veronica), performing three replicates per treatment, resulting in a decrease in drying time to the temperature of 70 ° C for the three varieties. The results obtained were built drying curves, in which it was found that this process took place in the period decreasing. Drying curves were fitted to mathematical models, determining by the R² and the sum of squared errors (SSE), that page is the model that best describes the drying process.

Keywords: Drying kinetics, mathematical models, equilibrium moisture, activation energy, effective diffusivity.

Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de yuca industrial

Resumen

El secado de tres variedades de yuca, se realizó en un secador tipo túnel; se evaluó el efecto de la temperatura, variedad y velocidad de aire de secado en el tiempo de secado, empleando un diseño completamente al azar en arreglo factorial con tres factores: temperatura (45, 55 y 70 °C), velocidad de aire de secado (1, 3 y 4 m/s) y variedad (Corpoica Tai, Gines y Veronica), realizando tres repeticiones por tratamiento, dando como resultado una disminución en el tiempo de secado para la temperatura de 70°C para las tres variedades. Con los resultados obtenidos fueron construidas las curvas de secado, en las cuales se observó que éste proceso tuvo lugar en el período decreciente. Las curvas de secado fueron ajustadas a modelos matemáticos, determinando mediante el R² y la suma de errores cuadrados (SSE), que el modelo de page es el que mejor describe el proceso de secado.

Palabras clave: Cinética de secado, modelos matemáticos, humedad de equilibrio, Energía de Activación, Difusividad efectiva.

1. Introducción

La yuca es un cultivo que se produce en todo el mundo, su producción anual es de 170 millones de toneladas y se destaca al continente africano como el de mayor área sembrada y producción obtenida. América latina produce 34 millones de toneladas aproximadamente la quinta parte de la producción mundial con una participación del 18.5%. Por su parte Colombia produce 1.8 millones de toneladas y ocupa el tercer puesto en Latinoamérica después de Brasil y Paraguay. La mayor zona productora de yuca en Colombia es la costa atlántica que participa con el 49% del área cultivada en el país. [1]

Este producto participa en cuatro mercados según los usos principales del mismo como son: raíz para consumo humano, como insumo en la industria alimenticia, como producto intermedio en la industria no alimenticia y como materia prima en la industria productora de alimentos balanceados para animales, siendo este último uno de los principales usos que toma cada vez mayor importancia dentro del mercado de este tipo de producto. [1]

El aumento de los precios del maíz, genera que la yuca seca sea una alternativa rentable para los avicultores en la preparación de las raciones para alimentos concentrados para animales. Los productores de yuca seca deben estar preparados para atender esta demanda, por lo que tienen que

optimizar sus procesos para aumentar su productividad y calidad. [2]

A medida que el mercado de alimentos concentrados para animales fue creciendo, se planteó la necesidad de la mejora de sistemas de secado de yuca y es así cuando se implementa el secado mixto de yuca que esperaba disminuir los tiempos de secado y aumentar la productividad, rendimientos de los trozos de yuca seca fresca. [3]

El secado, definido como un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa entre el producto y el aire de secado, consiste en la remoción de humedad excesiva contenida en el producto por medio de la evaporación, generalmente por convección forzada[4,5]; es un método clásico de preservación de alimentos y se convierte en una excelente alternativa para prolongar el período de vida útil del tubérculo, así como para disminuir el peso para el transporte y reducir el espacio requerido para su almacenamiento. [6-8]

Estudios en torno al secado de frutos y vegetales han determinado que es un proceso difícil de describir, debido a la complejidad de los fenómenos internos y externos que ocurren durante el secado [9]. No obstante, en la literatura se encuentran varios métodos propuestos para analizar el secado en capa fina de productos alimenticios: modelos teóricos, semiteóricos y empíricos. Los modelos de secado basados en la teoría de difusión de líquidos han sido preferidos por los investigadores en el área de secado de alimentos [10]. Entre ellos se encuentran los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis modificado [5]. Estos modelos de secado no solo permiten predecir el mejor proceso, sino que también ofrecen herramientas para predecir las condiciones de almacenamiento y empaque; además, ayudan a establecer el contenido final de humedad de los productos agrícolas y los requisitos del proceso de secado. [8].

La aplicación del secado como una operación que garantice la calidad del producto deshidratado y que además sea viable desde el punto de vista económico requiere de un estudio previo que permita determinar las condiciones y parámetros a tener en cuenta para garantizarlo. En éste trabajo se realizaron y modelaron las curvas de secado de tres variedades de yuca industrial (Corpoica Tai, Corpoica Gines y Corpoica Veronica.).

2. Materiales y métodos

2.1. Obtención y adecuación de la materia prima

La materia prima, yuca industrial en las variedades Corpoica Tai, Corpoica Veronica y Corpoica Gines fueron suministradas por la Empresa ASPROALGA ubicada en el Municipio los Algarrobos y acondicionada con la geometría y dimensiones con las cuales son procesadas en la planta de secado.

La geometría utilizada fue láminas que constan de las siguientes dimensiones: 3.6 cm de largo por 0.6 cm de ancho por 0.5 cm de espesor, obtenidas con una cortadora a escala laboratorio, el cual contribuye al aumento de la superficie de contacto de la yuca con el aire circundante de secado.

2.2. Equipos y procedimientos

Se utilizó un secador tipo túnel de UPB Montería que consta de un ventilador tipo blower acoplado a un motor AC trifásico de 1.1 Kw a 1200 rpm en conexión Y-Y a 4.6 A, sistema que permite la entrada de aire a diferentes velocidades de flujo; un convertidor de frecuencia modular para motores individuales de pequeñas y medias potencias, marca YASKAWA de la serie VS mini J7; el Calefactor está conformado por unas placas de resistencias eléctricas de nicrom capaces de generar hasta 70°C al final del tubo; el control de temperatura tiene implementado un controlador digital tipo PID que le permitía a un relé de estado sólido microcontrolado, controlar el suministro de potencia a un calentador resistivo; el sistema de adquisición de datos cuenta con una tarjeta de circuitos, la cual constaba de cuatro etapas que son: sensado, filtrado, amplificación, digitalización y envío de datos, recepción y transformación de datos de control. La interfaz gráfica básicamente, es de usuario hecha en MATLAB®, en donde se visualizaban gráficamente los datos obtenidos a través de los sensores de temperatura y humedad.

2.3. Humedad inicial

Inicialmente se tomaron muestras representativas del producto para determinar el contenido de humedad de la yuca acuerdo al método de estufa a 105°C durante 24 horas. [11]

2.4. Construcción de curvas de secado

Para la construcción de las curvas de secado, se establecieron como variables de proceso a la temperatura de bulbo seco en tres niveles (45, 55, 70°C), velocidad del aire de secado en tres niveles (1, 3 y 4 m/s) y variedad de yuca en tres niveles que son Corpoica Tai, Corpoica Verónica y Corpoica Ginés

Luego se determinó el área de secado del producto y peso de la bandeja; distribuyéndose las muestras del producto lo más uniformemente posible sobre la bandeja, con un posterior pesaje de esta con el propósito de determinar el peso inicial del producto a secar. Realizado este proceso se establecieron las condiciones de operación del secador. El cual cuenta con una termocupla en el interior de la cámara de secado, que registra la temperatura de bulbo seco del aire y con la ayuda de un sensor se obtiene el valor de la humedad relativa al interior de la cámara. Una vez alcanzadas las condiciones establecidas y el estado estable de las variables dentro de éste, se procede a ubicar la bandeja de acero inoxidable en un soporte acoplado a una balanza analítica con precisión de 0.001 g, que permitió registrar, a través de un sistema de adquisición de datos de temperatura, la variación de peso del producto en el tiempo de manera ininterrumpida, registrando estos valores de tiempo en intervalos de 10 segundos, hasta obtener un peso constante. Este proceso se ejecutó de igual forma para cada tratamiento. Para la construcción de las curvas de secado se utilizó el método descrito por Geankoplis [12], el cual consiste en graficar el contenido de humedad del producto

en base seca contra el tiempo para la determinación de las curvas de secado, y graficar la velocidad de secado contra la humedad libre del producto para la determinación de las fases de secado.

Para el ajuste y modelamiento matemático de los datos experimentales de las curvas de secado, se utilizó el modelo difusional de la solución de la segunda ley de Fick para una geometría de lámina infinita para tiempos largos, según la ecuación 1 [13]. Y los modelos empíricos que se muestran en la Tabla 1, los cuales utilizan como variable dependiente la fuerza impulsora reducida (MR) descrita con la ecuación 2, que relaciona el gradiente de la humedad de la muestra a tiempo real con la humedad inicial y la humedad de equilibrio [14-17]. Luego, se asume de la ecuación 1 que la difusividad (Deff) es constante. Donde: X_t es el contenido de humedad a tiempo real (g agua/g m.s.); X_0 es el contenido de humedad inicial (g agua/g m.s.) y X_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio (g agua/g m.s.). MR es la fuerza impulsora reducida (adimensional); Deff es el coeficiente efectivo de difusividad de agua (m^2/s); t es el tiempo (segundos), L es el medio espesor de la lámina finita (m) y n es el número de series de la sumatoria.

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

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

Además, a las curvas de secado experimentales se les realizó un ajuste de acuerdo a modelos o ecuaciones empíricas muy utilizadas en la literatura; tales como Newton o también conocido como Lewis, Henderson-Pabis, el Page, Page modificado, Wang-Sing y otros tres modelos propuestos en este estudio [18-20]. Donde: k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , k_7 y k_8 son los parámetros empíricos de comportamiento cinético (min^{-1}); mientras que n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 , n_6 y n_7 son parámetros característicos del producto.

Para evaluar la calidad del ajuste obtenido de los modelos propuestos sobre los datos experimentales, se utilizó el coeficiente de regresión lineal (R^2) y la suma de los errores cuadrados (SSE); los valores más bajos SSE o que tienden a cero, junto con los más altos de R^2 o que tienden a uno, se consideraron como óptimos y ayudaron a elegir el mejor modelo.

Tabla 1.
Modelos matemáticos para ajustar la Cinética de secado de las tres variedades de yuca

NOMBRE	MODELO
Newton – Lewis	$MR = \exp(-k_1 * t)$
Henderson - Pabis	$MR = n_1 * \exp(-k_2 * t)$
Page	$MR = \exp(-k_3 * t^{n_2})$
Modified page	$MR = \exp((-k_4 * t)^{n_3})$
Wang – Singh	$MR = k_5 * t^2 + n_4 * t + 1$
Raíz del tiempo	$MR = n_5 + k_6 * \sqrt{t}$
Raíz de MR	$MR = (n_6 + k_7 * t)^2$
Exponencial	$MR = \exp(n_7 + k_8 * t)$

Fuente: [5]

2.5. Procesamiento y análisis estadístico

El experimento fue conducido bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial de tres factores: temperatura, velocidad del aire y variedad de yuca. El factor temperatura en tres niveles (45, 55, y 70)°C; el factor velocidad del aire en tres niveles (1, 3 y 4)m/s, el factor variedad en tres niveles (Variedad Corpoica Tai, Corpoica Veronica y Corpoica Gines); para un total de 81 unidades experimentales.

El análisis de los datos se realizó mediante un Análisis de Varianza usando un modelo de tres vías de clasificación (variedad, temperatura y velocidad del aire), con el fin de comparar el promedio de temperatura, velocidad del aire, variedades, y verificar si existe interacción entre ellas. Para la comparación de las medias se usó la prueba de Tukey con 5% de nivel de significancia, además, se realizaron pruebas de los supuestos del modelo (normalidad, independencia y homogeneidad de varianza). Se utilizó el programa SAS versión 9.1.

3. Resultados y discusión

3.1. Humedad Inicial

Los contenidos de humedad inicial para las variedades Corpoica Tai, Corpoica Gynes y Corpoica Veronica fueron 1.410% (b.s), 1.820% (b.s) y 2.096% (b.s) respectivamente; nótese que son valores diferentes para cada variedad.

3.2. Curvas de secado

En las Figs. 1 a 9 se observa claramente la influencia de la temperatura y la velocidad del aire de secado sobre el proceso de secado de yuca industrial para las variedades objeto de estudio. Al aumentar la temperatura y la velocidad del aire de secado se disminuye significativamente el tiempo de secado, es decir se necesita menos tiempo para finalizar el proceso de secado a una temperatura de 70°C y velocidad del aire de secado de 4m/s. Los tiempos de secado fueron de 93.32min, 91.64min y 8.28min para las variedades Corpoica Tai, Corpoica Gines y Corpoica Veronica respectivamente; resultados similares obtuvieron otros autores trabajando con otras especies, vegetales y cereales [4,8,17,20-25]. También se observa que aproximadamente en la primera hora de secado (dependiendo de la variedad y la velocidad del aire), que la humedad en base seca decrece linealmente ($R^2 > 90\%$), esto es, dx/dt es una constante, al igual que la velocidad de secado para éste mismo periodo. De igual forma, después de la primera hora de secado la velocidad disminuye con mayor rapidez (Periodo decreciente) hasta llegar a su humedad de equilibrio. Esta etapa se caracteriza porque en ella ocurre la mayor parte del secado, pues la humedad se difunde con menor velocidad a través del sólido [26,27]. Por otra parte, se pudo observar que el tiempo final de secado, a las condiciones de temperaturas y velocidades trabajadas experimentalmente fue aproximadamente igual para las tres variedades de yuca industrial.

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) para el tiempo de secado (t) de yuca industrial.

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
VARD	2	8891,1688	4445,5844	2,29	0,1109
VEL	2	157111,8713	78555,9357	40,48	<,0001
TEMP	2	241899,2959	120949,6479	62,32	<,0001
VARD*VEL	4	16335,2582	4083,8145	2,1	0,0929
VARD*TEMP	4	25992,7917	6498,1979	3,35	0,0161
VEL*TEMP	4	23376,8468	5844,2117	3,01	0,0258
VARD*VEL*TEMP	8	49906,6773	6238,3347	3,21	0,0047

Fuente: Los autores

Los resultados descritos anteriormente se pueden evidenciar en el análisis de varianza, ANOVA que se muestra en la Tabla 2, donde se observa una influencia altamente significativa de la temperatura sobre el tiempo de secado y de igual manera, una influencia significativa de la velocidad de aire de secado, en tanto que la variedad no presentó influencia significativa, a un nivel de significancia del 5%. Luego de realizar la prueba de comparación de medias de tukey, se observó que no hubo diferencias significativas entre los tiempos de secado para las velocidades de 3m/s y 4m/s, pero éstas dos difieren de los valores del tiempo de secado calculado a la velocidad de 1m/s; respecto a la temperatura, ésta si tuvo diferencias significativas para los valores del tiempo de secado calculados para los tres niveles estudiados, 45, 55 y 70°C.

Para determinar las mejores condiciones de velocidad del aire y temperatura del aire de Secado, con fines a obtener costos menores de producción se tomó como base el análisis de varianza y una prueba de Tukey para comparar las medias de las variables de interés. De lo cual se puede afirmar que las mejores condiciones son: Temperatura de 70°C, porque según el análisis de comparación de medias de Tukey a ésta condición fue donde se obtuvieron los menores tiempos de secado de la yuca para las tres variedades y la velocidad del aire al no presentar diferencias

estadísticamente significativas de los valores de tiempo de secado calculados para 3m/s y 4m/s, se puede utilizar indiferentemente cualquiera de las dos velocidades de aire de secado debido a que los resultados son iguales.

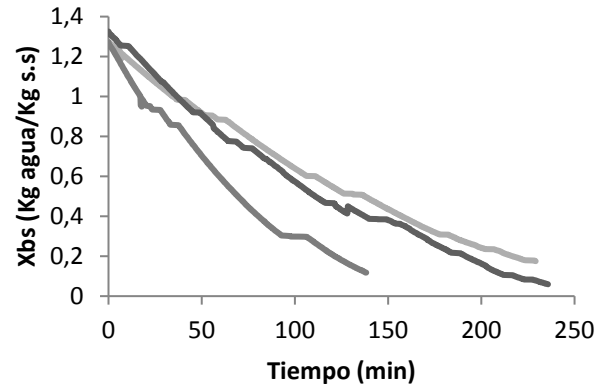


Figura 2. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Gines Fuente: Los autores

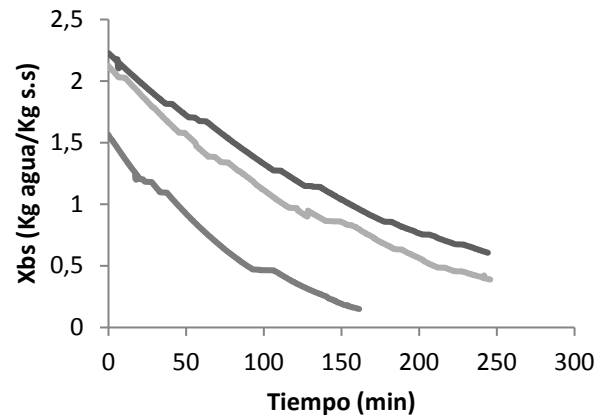


Figura 3. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Verónica Fuente: Los autores

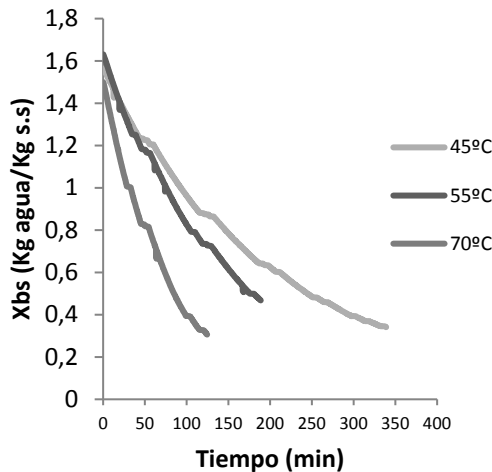


Figura 1. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai Fuente: Los autores

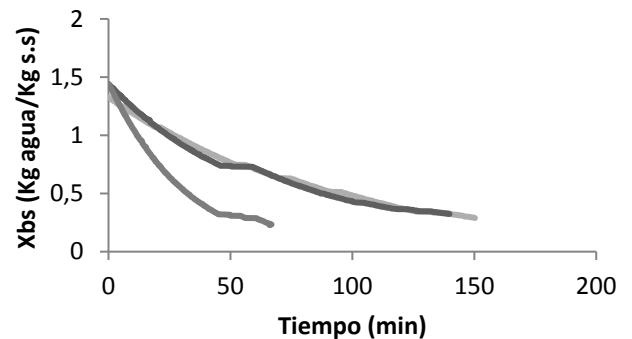


Figura 4. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai Fuente: Los autores

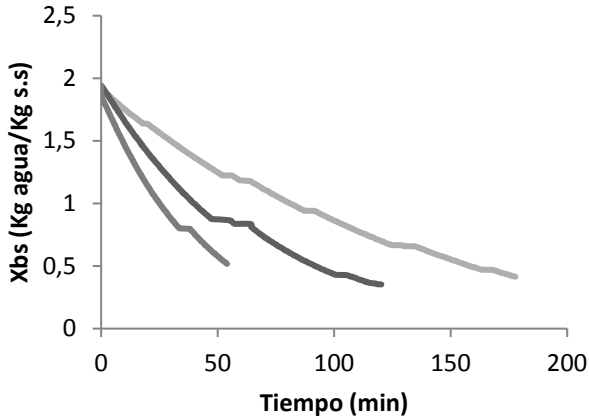


Figura 5. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Gines
Fuente: Los autores

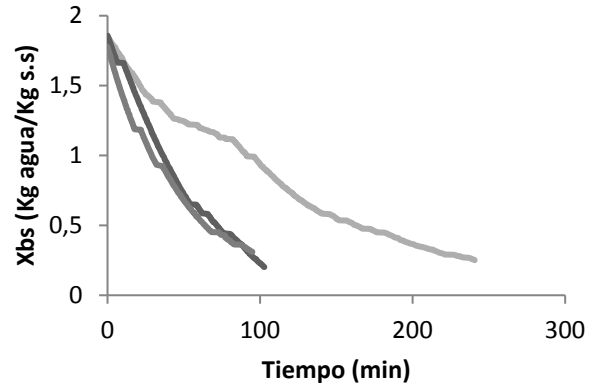


Figura 8. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Gines
Fuente: Los autores

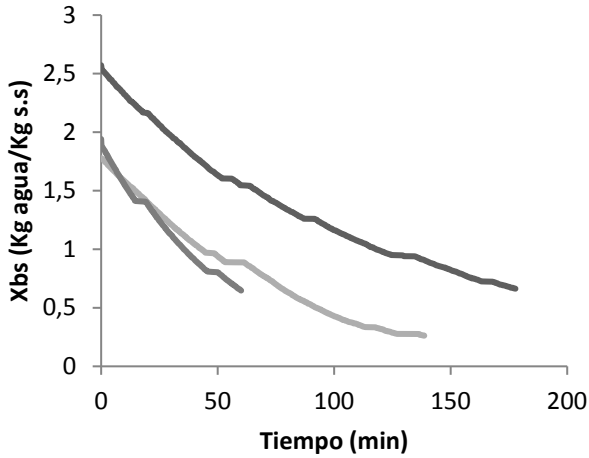


Figura 6. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Verónica
Fuente: Los autores

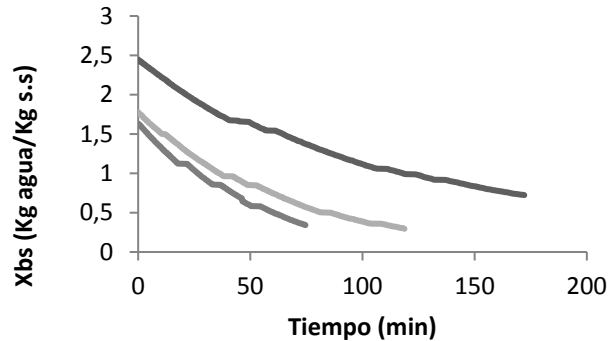


Figura 9. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Verónica
Fuente: Los autores

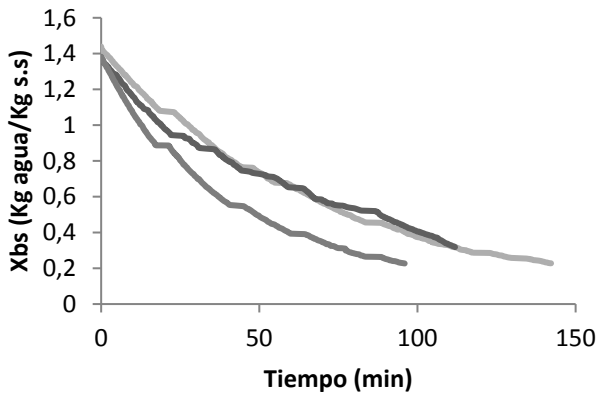


Figura 7. Curvas de rapidez de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai
Fuente: Los autores

3.3. Curvas de velocidad de secado

En las Figs 10 a 18 se ilustran las curvas obtenidas de la cinética de secado de tres variedades de yuca en las condiciones del experimento. Como se puede observar, se presentan las curvas clásicas que siguen los alimentos [23], esto es, existe un período de secado a velocidad constante y un período de secado a velocidad decreciente, siendo este último el que predomina durante el proceso por lo que es el más estudiado en el secado de alimentos. Analizando las curvas se aprecia, en términos generales, que al aumentar la temperatura del aire de secado aumenta la velocidad de éste. Por lo tanto, en función de los resultados obtenidos se deduce que la cinética de secado de yuca para las variedades Tai, Gines y Verónica es dependiente de la temperatura del aire de secado. También se observa que en el secado de yuca a la temperatura de 70°C y 1 m/s para la variedad Tai, se genera una velocidad de 0,0124865 Kg H₂O/Kg m.seca.min, que resulta significativamente superior a la velocidad de secado alcanzada a una temperatura de 45°C a la misma velocidad que es de 0,0059418 Kg H₂O/Kg m.seca.min para ésta misma variedad; condición que se

cumple para las tres variedades y para las diferentes condiciones de velocidad del aire. Por otra parte, se observan diferencias entre la velocidad de secado de las tres variedades, es decir, la velocidad de secado para la variedad Veronica es mayor que la velocidad de secado de las variedades Gines y Tai, y a su vez la variedad Gines presenta una velocidad de secado superior a la velocidad de secado de la variedad Tai.

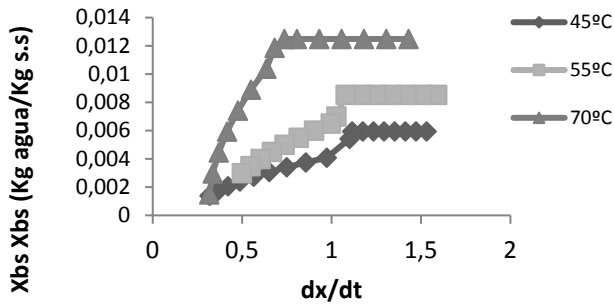


Figura 10. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai
Fuente: Los autores

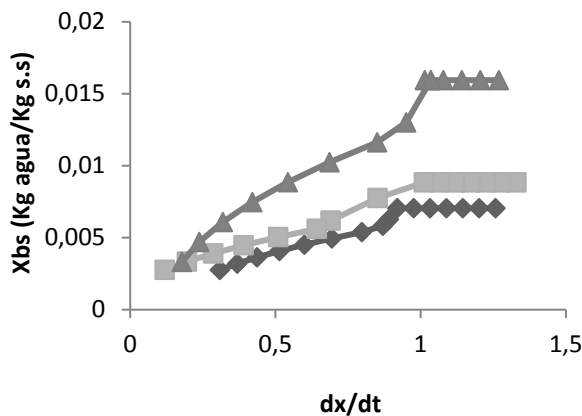


Figura 11. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Gines
Fuente: Los autores

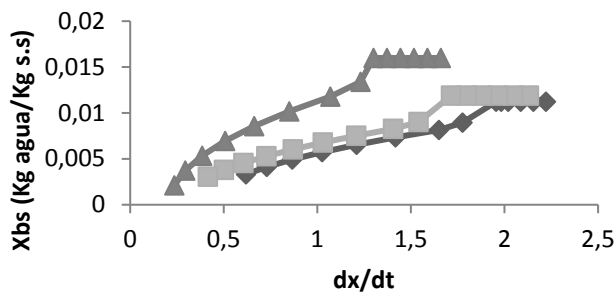


Figura 12. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 1m/s a diferentes temperaturas. Variedad Veronica
Fuente: Los autores

Además se distinguen solo dos etapas de secado; el periodo de latencia o inducción no se evidencia en la curva debido a que la muestra al momento de ser introducida en el secador, éste ya se encuentra a la temperatura requerida. La primera etapa que se evidencia en la curva es la de velocidad constante, en la que la temperatura del alimento ha alcanzado su valor de equilibrio; la superficie del producto está muy mojada al principio por el alto contenido de humedad que es característico de la yuca, por lo tanto el secado se da como si el sólido no estuviera presente. La segunda etapa corresponde a un periodo de velocidad decreciente en la que se lleva a cabo la mayor parte del proceso, esto demuestra que la difusión es el mecanismo físico dominante que gobierna el movimiento de la humedad en el secado de las muestras de yuca. Similares resultados fueron reportados para judías [28], Okra [20,29], berenjena [10] y D. Rotundata y D. alata [25].

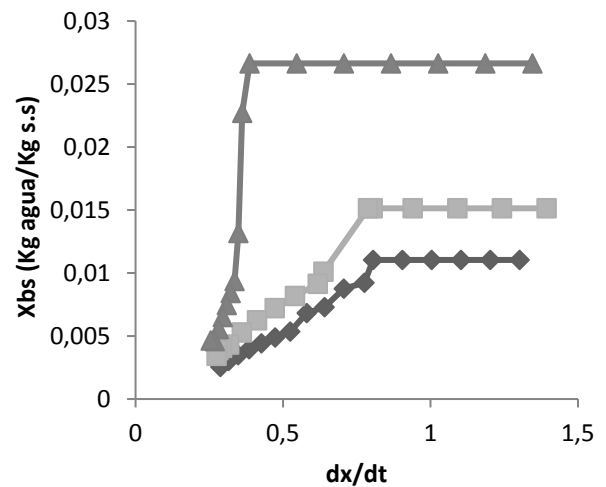


Figura 13. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai
Fuente: Los autores

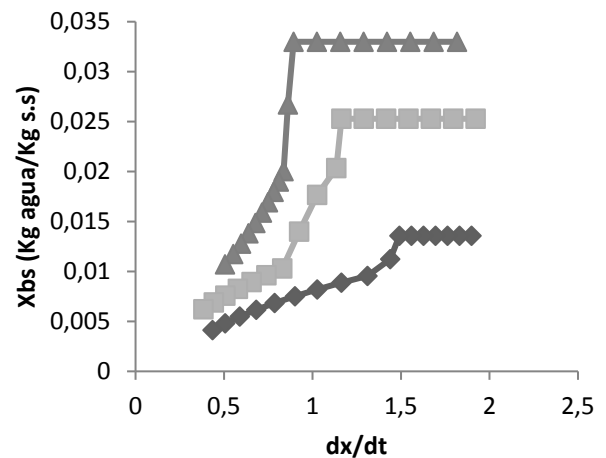


Figura 14. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Gines
Fuente: Los autores

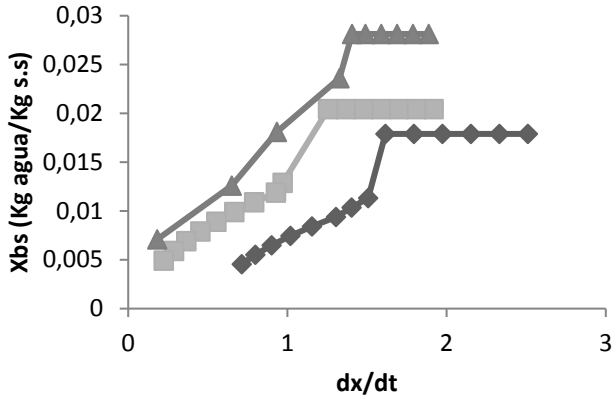


Figura 15. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 3m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Veronica Fuente: Los autores

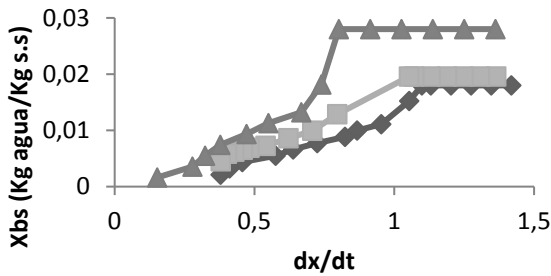


Figura 16. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Tai Fuente: Los autores

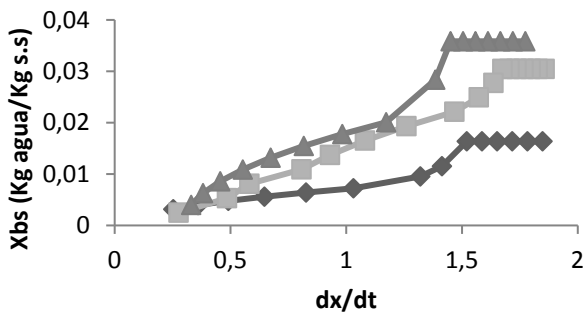


Figura 17. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Gines Fuente: Los autores

3.4. Coeficiente difusivo (Df) y Energía de activación (Ea)

El cálculo del coeficiente difusivo o difusividad efectiva se realizó con el fin de modelar el periodo de velocidad decreciente en el secado de tres variedades de yuca.

Los valores de difusividad aumentaron con el incremento de la temperatura y de la velocidad del aire de secado como se observa en los valores reportados en la

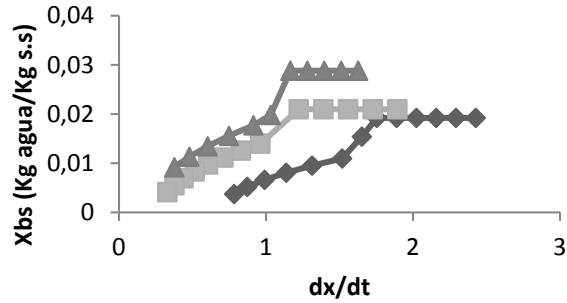


Figura 18. Curvas de velocidad de secado para la velocidad de aire de secado de 4m/s a diferentes temperaturas. Variedad Corpoica Veronica Fuente: Los autores

Tabla 3, lo que muestra una disminución de las resistencias internas del sólido con el acrecentamiento de la temperatura y velocidad del aire de secado. Una explicación de esa adición puede ser debida al menor encogimiento observado en las temperaturas y velocidades de aire de secado más altas; menor encogimiento implica

Tabla 3. Difusividad efectiva Deff, energía de activación Ea y factor de Arrhenius D0, para las variedades Corpoica Tai, Corpoica Gynes y Corpoica Veronica.

Var	Vel (m/s)	Temp (°C)	Df (m²/s)	Ea (KJ/mol)	D0 (m²/s)
TAI	1	45	2,58675E-10		
TAI	1	55	7,57649E-10	47,9898598	0,023914403
TAI	1	70	1,0249E-09		
TAI	3	45	5,23152E-10		
TAI	3	55	8,99584E-10	51,7069762	0,159654811
TAI	3	70	2,16389E-09		
TAI	4	45	1,0462E-09		
TAI	4	55	9,08066E-10	9,90133416	4,02829E-08
TAI	4	70	1,33868E-09		
GINES	1	45	4,60136E-10		
GINES	1	55	5,29699E-10	28,0708427	1,75587E-05
GINES	1	70	9,78917E-10		
GINES	3	45	6,00788E-10		
GINES	3	55	1,07477E-09	38,6789057	0,001424438
GINES	3	70	1,76959E-09		
GINES	4	45	4,82666E-10		
GINES	4	55	1,06559E-09	40,6773304	0,002610586
GINES	4	70	1,53153E-09		
VERON	1	45	5,24807E-10		
VERON	1	55	5,43503E-10	21,1562943	1,45106E-06
VERON	1	70	9,20256E-10		
VERON	3	45	8,22768E-10		
VERON	3	55	8,222E-10	19,4014037	1,16477E-06
VERON	3	70	1,37241E-09		
VERON	4	45	7,75415E-10		
VERON	4	55	1,22937E-09	28,3617711	3,71119E-05
VERON	4	70	1,71825E-09		

Fuente: Los autores
Tabla 4.

ANOVA para el coeficiente difusivo de la humedad D_{eff}

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
VARD	2	0,23778135	0,11889068	20,71	0,003
VEL	2	0,08049877	0,04024938	7,01	<,0001
TEMP	2	0,05034241	0,02517121	4,39	<,0001
VARD*VEL	4	0,26707531	0,06676883	11,63	0,0172
VARD*TEMP	4	0,27029042	0,06757261	11,77	0,0006
VEL*TEMP	4	0,13193178	0,03298294	5,75	<,0001
VARD*VEL*TEMP	8	0,09914295	0,01239287	2,16	0,0455

Fuente: Los autores

una mayor porosidad y consecuentemente una mayor área de transferencia de masa. Resultados similares se obtuvieron en diferentes frutas [21,23,24,30,31]. Por otra parte, el análisis de varianza que se muestra en la Tabla 4, indica que existe una influencia altamente significativa de la temperatura y la velocidad del aire de secado y de la interacción entre estos dos; y el análisis de comparación de medias evidenció diferencias estadísticamente significativas para las difusividades calculadas para las tres temperaturas, 45, 55 y 70°C; como para las tres velocidades del aire de secado, 1, 3 y 4 m/s.

La energía de activación (Tabla 3) presenta una magnitud que se encuentra dentro del rango de valores encontrados en la literatura para materiales alimenticios, rango que va desde 12,7 a 110 Kj/mol; 28, 39 Kj/mol para zanahoria [17] y 20 Kj/mol para papa [24]. Estas magnitudes representan la energía requerida para iniciar la difusión de la humedad de las tres variedades de yuca estudiadas durante el secado y dan un indicio de la influencia de la temperatura en el proceso [26]

3.5. Modelación matemática de la cinética de secado de yuca

Los modelos de Newton-Lewis, Page, Page modificado y Hernderson-Pabis se ajustan satisfactoriamente a los datos experimentales obtenidos para la construcción de las curvas de secado de las tres variedades de yuca a las temperaturas estudiadas, una vez que sus valores de coeficiente de regresión lineal (R^2) fueron superiores a 90% y los errores (SSE) inferiores al 10%. Sin embargo, el modelo que mejor describe el comportamiento de los datos de secado de las tres variedades de yuca estudiadas, para las condiciones de temperatura y velocidad del aire, es el modelo de Page; lo anterior se puede evidenciar en la Tabla 5. Resultados similares (modelo de Page) fueron obtenidos para la modelación de la cinética de secado del tomillo [32]; para el modelado de la cinética de secado de capuaçu [33]; para el modelado de la cinética de secado de Cajuil [34]; para el Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena. [35]

Tabla 5.

Criterios estadísticos R^2 y SSE de ajuste de modelos para las curvas experimentales de secado y constantes del modelo de Page para las tres temperaturas, tres velocidades de aire y para las tres variedades.

	Page, Corpoica Tai			Page, Corpoica Gines			Page, Corpoica Veronica		
	V=1m/s T°=45	1m/s T°=55	1m/s T°=70	1m/s T°=45	1m/s T°=55	1m/s T°=70	1m/s T°=45	1m/s T°=55	1m/s T°=70
R^2	0,990	0,991	0,974	0,986	0,980	0,987	0,990	0,9500	0,992
k_3	0,007	0,004	0,010	0,003	0,004	0,005	0,003	0,0039	0,005
n_2	0,950	1,212	1,126	1,213	1,157	1,243	1,243	1,1692	1,234
SS	3,162	3,581	8,243	8,246	10,356	4,515	5,768	0,9808	2,815
	V=3m/s T°=45	3m/s T°=55	3m/s T°=70	3m/s T°=45	3m/s T°=55	3m/s T°=70	3m/s T°=45	3m/s T°=55	3m/s T°=70
R^2	0,953	0,989	0,990	0,977	0,991	0,973	0,992	0,993	0,915
k_3	0,012	0,019	0,026	0,008	0,017	0,036	0,008	0,008	0,039
n_2	0,970	0,980	1,139	1,082	1,037	1,009	1,109	1,148	0,903
SS	16,87	3,113	1,421	8,032	2,378	4,143	2,432	2,398	14,617
	V=4m/s T°=45	4m/s T°=55	4m/s T°=70	4m/s T°=45	4m/s T°=55	4m/s T°=70	4m/s T°=45	4m/s T°=55	4m/s T°=70
R^2	0,994	0,970	0,993	0,928	0,968	0,992	0,989	0,992	0,984
k_3	0,012	0,025	0,031	0,020	0,010	0,021	0,010	0,010	0,016
n_2	1,088	0,937	0,956	0,843	1,140	1,052	1,069	1,137	1,147
SS	1,202	5,798	1,405	20,621	8,008	1,433	2,972	1,699	2,596

Fuente: Los autores

4. Conclusiones

La temperatura del aire de secado tuvo una gran influencia en el tiempo de secado, evidenciándose menores tiempos con cada incremento de ésta; de la misma manera, la velocidad del aire de secado también permitió obtener menor tiempo de secado para las tres variedades estudiadas, en tanto las tres variedades presentaron tiempos de secado estadísticamente iguales bajo un nivel de significancia del 5%.

Las curvas de secado permitieron identificar claramente un periodo de velocidad constante y otro decreciente para cada una de las variedades, temperaturas y velocidades de aire de secado estudiadas.

La difusión es el mecanismo físico que gobierna la migración de humedad de yuca en las variedades Corpoica Tai, Corpoica Gines y Corpoica Veronica, por cuanto los datos experimentales se ajustaron correctamente a la ecuación de Fick. Los modelos de Newton-Lewis, Page, Page modificado y Hernderson-Pabis, explican bien los datos de secado bajo las condiciones estudiadas; no obstante, es el modelo de Page el que mejor explica el comportamiento de los datos experimentales, una vez que presenta los valores más altos de coeficiente de regresión lineal (R^2) y los más bajos de la suma de los errores cuadrados (SSE) para todas las temperaturas (45, 55 y 70°C) y velocidades de aire de secado utilizadas en este estudio (1, 3 y 4 m/s). Las condiciones que mejoran el proceso de secado se presentan para 70°C y 3m/s o 4m/s.

Referencias

- [1] Martínez, A. M., La yuca como componente de la cadena avícola, disertación Ph.D., Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Córdoba, Colombia, 2003.
- [2] www.corpoica.org.co/sitiorcorpoica/planes/yuca/documentos/informes/informe_ejecutivo%202003.htm

- [3] Gottret, M., Guy H. y Dufour, D., Proyecto integrado de investigación y desarrollo de la producción y transformación de yuca para la obtención y comercialización de almidón agro de yuca. CIAT. Cali, Colombia, 2007.
- [4] Maldonado, R. y Pacheco, T., Curvas de deshidratación del Brócoli (*Brassica Oleracea L. var Italica Plenck*) y Coliflor (*Brassica oleracea L. var Botritis*), Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, 20, pp. 306-319, 2003.
- [5] Ertekin, C. and Yaldiz, O., Draying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model., *Journal of food engineering*, 63(3), pp. 349-359, 2005.
- [6] Romero, C. y Kieckbsh, T., Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de Tomate., *Brazilian Journal of food Technology*, 6 (1), pp. 69, 2003.
- [7] Cardoso, F., Palmeira, J., Rodrigues, M., Honorato, F. y Alves, S., Comparación de modelos matemáticos de calor isotérmico de desorción en pulpa de Guayaba., *Revista Brasileira de almacenamiento*, 29 (1), pp. 28-34, 2004.
- [8] Vega, A. y Fito, P., Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*capsicum annuum L. cv Lamuyo*), *Información tecnológica*, 16 (6), pp. 3-11, 2005.
- [9] Sandoval, S., Rodríguez, J., Méndez, L. y Sánchez, J., Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de Plátano Roatán., *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5 (1), pp.35-38, 2006.
- [10] Chaves, M., Sgroppo, S. y Avanza, J., Cinética de Secado de Bremjena (*Solanum melongena L.*), Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones científicas y tecnológicas, Corrientes-Argentina. Facultad de Ciencias Exactas y Agrimensura, 2003, [Citado Oct-06-2006], Resumen E-60, Disponible en Internet: <http://www.exa.unne.edu.ar>.
- [11] AOAC. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (n° 934.06), Arlington, USA, 1990.
- [12] Geankoplis, C., Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3a. Ed., Compañía Editorial Continental S. A. de C. V. México, 1998, 1022 P.
- [13] Crank, J., The mathematical of diffusion. Oxford University Press, Inc., Nueva York. 1975.
- [14] Park, K., Vohnikova, Z. and Reibros, F., Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa L.*). *Journal of Food Engineering*, 51 (3), pp. 193-199. 2002.
- [15] Akpinar, E., Bicer, Y. and Yildiz, C., Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59 (1), pp. 99-104, 2003.
- [16] Babalis, S. J. and Belessiotis, V. G., Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs, *Journal of Food Engineering*, 65 (3), pp. 449-458, 2004.
- [17] Simat, S., Femenia, A., Garau, M.C., Femenia, A. and Roselló, C., Drying of red pepper (*Capsicum Annuum*): Water desorption and quality, *International Journal of Food Engineering*, 1 (4), pp. 1-13, 2005.
- [18] Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa W. and Belghith, A., Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes, *Journal of Food engineering*, 55 (4), pp. 323-330, 2002.
- [19] Toğrul, T. and Pehlivan, D., Modeling of drying kinetics of simple apricot, *Journal of Food Engineering*, 58 (1), pp. 23-32, 2003.
- [20] Doymaz, I., Drying characteristics and kinetics of Okra, *Journal of Food engineering*, 69 (3), pp. 275-279, 2005.
- [21] Park, K., Vohnikova, Z. and Reibros, F., Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of mint leaves (*Mentha crispa L.*). *Journal of Food Engineering*, 61, pp. 187-193, 2004.
- [22] Mahopatra, D. and Rao, P., A thin layer drying model of parboiled wheat, *Journal of food engineering*. 66 (4), pp. 513-518, 2005.
- [23] Vega, A., Lemus R., Modelado de la cinética de secado de papaya chilena (*basconcellea pubescens*), *Información tecnológica*. 17 (3), pp. 23-31, 2006.
- [24] Ocampo, A., Modelo cinético del secado de la pulpa de mago., *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*, 5, pp. 119-128, 2006.
- [25] Falade, K., Olurin, T., Ike, E. and Aworh, O., Effect of pre-treatment and temperatura on air-Drying of *Discorea alata* and *Discorea rotundata* slices, *Journal of food engineering*, 80 (4), pp. 1002-1010, 2007.
- [26] Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J. y Meza, I., Modelado de la cinética de secado de Ñame (*Dioscorea Rotundata*) en capa delgada, *Revista Ingeniería e Investigación*, 28 (2), pp. 45-52, 2008.
- [27] Hernández, C., Ossa, Z., Ramírez, L. y Herrera, W., Influencia del espesor y la temperatura en el secado de Carambola, *Ingenierías & Amazonia*, 4 (2), pp. 131-142, 2011.
- [28] Rosello, C., Simal, S. and San Juan, N., Nonostropic mass Transfer model for green Bean Drying., *Journal of Agricultura and Food Chemistry*, 45, pp. 337-342, 1997.
- [29] Göğüs, F. and Maskan, M., Water adsorption and drying characteristics of Okra (*Hibiscus esculentus L.*), *Drying Technology*, 17 (4), pp. 883-894, 1999.
- [30] Nicoletti, F., Cinética de secado y encogimiento de rodajas de Piña, Tesis MSc., Departamento de Ingeniería de Alimentos, Universidad Estatal Paulista, Campus San José de Río Prieto-Brasil, 2001.
- [31] Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J. y Meza, I., Modelado de las isoterms de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*), *DYNA*, 76 (157), pp. 145-152, 2009.
- [32] Da Rocha, R., Melo, E., Corbín, J., Berbert, P., Donzeles, S. y Tabar, J., Cinética del secado de Tomillo, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (6), pp. 675-683, 2012.
- [33] Giraldo, A., Arévalo, A., Silva, A., Silva, P., Valdes, J. y Pavlak, M., Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas, *Ciênc. Tecnol. Aliment*, 30 (1), pp. 179-182, 2010.
- [34] Michalewicz, J., Henriquez, J. y Charamba, J., Secado de Cajuil (*anacardium occidentale L.*) Estudio Experimental y modelado de la cinética de secado, *Información Tecnológica*, 22 (6), pp. 63-74, 2011.
- [35] Vega, A. y Lemus R., Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*), *Información Tecnológica*, 17 (3), pp. 23-31, 2006.

A. M. Torregroza-Espinosa, Ing. Agroindustrial en el año 2008 de la Universidad de Sucre, Colombia; MSc. en Ciencias Agroalimentarias en el año 2013 de la Universidad de Córdoba, Colombia. Docente de la Universidad de Sucre, Programa Ingeniería Agroindustrial.

E. J. Montes-Montes, Ing. Químico en el año 1991 de la Universidad del Atlántico, Colombia; MSc. en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Federal de Viçosa, Brasil en el año 2004. Docente investigador de la Universidad de Córdoba, Programa Ingeniería de Alimentos; Actualmente Jefe de Planeación de la Universidad de Córdoba.

A. E. Avila-Gómez, Ing. Mecánico en el año 2000 de la Universidad del Norte, Colombia; MSc. en Ingeniería Mecánica en el año 2006 de la Universidad del Norte, Colombia; docente investigador de la Universidad Pontificia Bolivariana Sede Montería, Programa Ingeniería Mecánica; Actualmente está cursando Doctorado en Electrical Engineering en University of South Florida.

J. F. Remolina-López, Ing. Electrónico en el año 2000 de la Universidad Pontificia Bolivariana Sede Bucaramanga, Colombia; MSc. en Ingeniería Biomédica en curso de la Universidad Favaloro, Buenos Aires-Argentina; docente investigador de la Universidad Pontificia Bolivariana Sede Montería, Programa Ingeniería Electrónica; actualmente Coordinador de Investigación e innovación UPB Montería.