



Secado de productos típicos de la Costa Caribe Colombiana bajo el análisis del Índice de Performance del Secador

Luis Enrique Mealla Sánchez

Departamento de Ciencias básicas, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia
luis.mealla@uac.edu.co

Recibido: Septiembre 03, 2021.

Recibido en su versión corregida: Octubre 14, 2021.

Aceptación: Octubre 22, 2021.

<https://doi.org/10.54606/Sextante2021.v25.05>

Cómo citar: Mealla Sánchez, L. (2021). Secado de productos típicos de la Costa Caribe Colombiana bajo el análisis del Índice de Performance del Secador. *Revista Sextante*, 25, pp. 44 - 51, 2021.

Resumen

Se presenta la aplicación de una metodología de evaluación de la cinética de secado aplicada a un conjunto de medidas generadas secando productos regionales en un secador solar de flujo natural, que utiliza una chimenea para ayudar a impulsar el aire. Las experiencias se realizaron bajo radiación solar evaluada en la Costa Caribe de Colombia, flujo de aire impulsado por diferencia de densidad proporcionada para la diferencia de temperatura ocasionada por el calentamiento del secador. Se tomaron cuatro grupos de medidas con distintos productos: cerdo en filetes delgados, yuca en rodajas, mango verde y maduro en rodajas. En el presente trabajo se muestra el comportamiento del secado de productos regionales bajo una metodología de análisis: el denominado Índice de Performance del Secador (IPS). Los resultados de esta metodología aplicadas al análisis de los datos arrojados confirman que es apropiado evaluar bajo esta metodología.

Palabras clave: *Convección natural; Energía solar; Índice de rendimiento del secador, Secado.*

Drying of typical products from the Colombian Caribbean Coast under the analysis of the dryer performance index

Abstract

The application of a drying kinetic evaluation methodology applied to a set of measurements generated by drying regional products in a natural flow solar dryer that uses a chimney to help drive the air is presented. The experiments were carried out under solar radiation evaluated in the Caribbean Coast of Colombia; air flow driven by density difference provided by the temperature difference caused by the heating of the dryer. Four groups of measurements were taken with different products: pork in thin fillets, cassava in slices, green mango, and ripe mango in slices. This work shows the drying behavior of regional products under an analysis methodology: the so-called Dryer Performance Index (IPS). The results of this methodology applied to the analysis of the data obtained confirm that it is appropriate to evaluate under this methodology.

Keywords: *Dryer performance index; Drying; Natural convection; Solar energy.*



1. Introducción

A medida que se avanza en la historia de la cultura humana se encuentran vestigios de secado con el uso de fuentes auxiliares de energía, tales como la quema de madera, sobre todo para cocinar ladrillos. Los alimentos a fin de conservarlos fueron expuestos a la radiación directa o a un proceso de desecado utilizando humo de madera, método aun empleado para la conservación de carnes.

Alrededor del siglo XVIII el secado de grandes cantidades de alimento comienza a tomar características industriales, es decir un proceso que utiliza exclusivamente energías convencionales.

La extracción de agua utilizando energía solar se presenta como una alternativa para lograr procesos a bajo costo y repetibles. Es de esperar que la combinación de distintos componentes que pudiesen formar parte de un secadero optimice el proceso de extracción de humedad en el tiempo para lograr un producto de calidad adecuada al menor costo. La elección de un sistema de secado solar está ligada a la eficiencia del proceso para extraer agua, utilizando la misma fuente de energía; por lo tanto, es necesario, utilizando la metodología adecuada, elegir cuál es la configuración más eficiente de secador.

Cuando se intenta analizar la performance de un secador, se puede recurrir a un conjunto de metodologías que se encuentran comúnmente en la literatura. Más precisamente Singh y Kumar (2012) proponen la metodología del Índice de Performance del Secador (IPS), basado en el ajuste de la curva de secado del producto mediante dos variables adimensionales: la masa de agua evaporada dividida la masa inicial y el tiempo adimensional obtenido al multiplicar el tiempo por un parámetro que proviene del ajuste exponencial de la curva de secado.

2. Descripción

2.1. Metodologías de análisis del comportamiento del secado

Existe un sinnúmero de metodologías para evaluar la performance de un secadero en cuanto a la velocidad de evaporación del agua, como en la calidad del producto que se obtiene; la comparación de mayor parte de estas metodologías es

enumeradas por Mujumdar (1987), Román (1995), Ekechukwu y Norton (1999), León et al. (2002), y Belessiotis y Delyannis (2011), donde no se tiene en cuenta la influencia de los parámetros meteorológicos para describir el comportamiento de los secadores.

A nivel nacional, Camaño et al. (2020), evaluó el comportamiento en el secado de ensilado químico de vísceras de tilapia roja (*Oreochromis sp*), en función de la ubicación de la muestra, dentro de un secador solar directo pasivo y del espesor de la película de la muestra. Modeló la cinética de secado utilizando seis modelos empíricos y uno fenomenológico. Los resultados mostraron que muestras con un espesor de 2.40 mm y ubicadas en posiciones cerca de la salida de aire, tienen mejor comportamiento durante el secado, garantizando un contenido de humedad del producto menor a 12%, y entregando valores más altos de coeficiente de difusión.

Villalba Vidales y Arzola de la Peña (2015) han desarrollado la revisión de una gran cantidad de modelos, tanto teóricos como experimentales, que buscan predecir la cinética de secado de diferentes tipos de sabio. Encontraron que aún no existe un modelo unificado que permita predecir los perfiles de temperatura y humedad para diversos materiales.

Mealla Sánchez (2012) presenta una comparación de dos metodologías de análisis del comportamiento del rendimiento de secaderos invernaderos de simple y doble cámara, aplicadas a un conjunto de medidas generadas en un prototipo de laboratorio construido a escala geométrica 1:100. Las experiencias de laboratorio se realizaron bajo radiación artificial de valor constante, flujo de aire a velocidades relacionadas mediante escala con un secador real. Utilizó dos metodologías de análisis: la del modelo de secadero invernadero y el denominado Índice de Performance del Secador (IPS). Los resultados de ambas metodologías aplicadas al análisis de los secaderos confirmaron que el mayor rendimiento lo tuvo el secador de doble cámara, comparado con el de cámara simple.

2.2. Método IPS

Cuando se intenta analizar la performance de un secador, se puede recurrir a un conjunto de metodologías que se encuentran comúnmente en la

literatura. Más precisamente Singh y Kumar (2012) proponen la metodología del Índice de Performance del Secador (IPS), basado en el ajuste de la curva de secado del producto mediante dos variables adimensionales: la masa de agua evaporada dividida la masa inicial y el tiempo adimensional obtenido al multiplicar el tiempo por un parámetro que proviene del ajuste exponencial de la curva de secado.

Un método con las características relacionadas en la bibliografía es el propuesto por Singh y Kumar (2012), que analizan el comportamiento del secador a partir de la curva de la cinética de secado de un determinado producto. Las variables que se tuvieron en cuenta, principalmente en la implementación de este método, fueron la energía recibida y la velocidad del aire, pero se observó que el espesor y la densidad del producto tenían también importancia en la curva generada. Se obtiene una curva a partir de la curva característica de variación de masa en el tiempo en un proceso de secado, en donde el peso a cualquier tiempo se divide entre el peso inicial. La nueva curva se expresa en términos del contenido adimensional de humedad referido a la masa inicial y el tiempo de secado expresado en segundos. Se realiza un ajuste propuesto por Dincer y Dost (1996) que cumple la relación que se muestra en la [Ecuación 1](#).

$$\Phi = \frac{M_t}{M_0} = k_0 \exp(-k \cdot t) \quad (1)$$

La mayor parte de las curvas de secado cuando predomina el fenómeno de transferencia de agua del producto hacia la superficie (producto higroscópico), se pueden aproximar por esta relación. Si bien, a simple vista el coeficiente k_0 es siempre igual a 1, en la práctica, al realizar el ajuste de una curva real expresada en términos como se menciona más arriba, es próximo a 1.

Los coeficientes de ajuste en la [Ecuación 1](#) indirectamente tienen dependencia de las variables meteorológicas. Para hacer un ajuste adimensional los parámetros deben ser más o menos independientes de las variables meteorológicas e invariables respecto al producto que se seca. La constante de secado k , en la regresión de la curva de secado, representa la capacidad de secar para un determinado conjunto secador-producto y dependerá de las características del producto como

también de condiciones de secado y características de diseño del secador. Para valores altos del parámetro (mayor que 1), seguramente se tendrán menores tiempos de secado. Comparar secadores por este parámetro no es lo indicado pues cada valor es característico de una combinación particular de producto, condiciones de secado y diseño del secador.

Se propone un parámetro adimensional τ mediante el producto del parámetro k y el tiempo en que cada dato es tomado, desarrollando una nueva forma de representar mediante las curvas características de secado generalizadas, mediante dos variables llamadas contenido de humedad y tiempo adimensionales de secado (Φ y τ). Las nuevas curvas generadas a partir de una curva de secado para un producto y un secador determinado se someten a una regresión como lo muestra la [Ecuación 2](#).

$$\Phi = \frac{M_t}{M_0} = \exp(-IPS \cdot \tau) \quad (2)$$

Se propone pasar de una curva particular expresada como $\Phi = f(t)$ dependiente del tiempo a una función adimensional $\Phi = f(\tau)$. Se debe tener en cuenta que esta vez, cuando se realice la regresión para valores de τ igual a cero, el valor del contenido de humedad debe dar igual a 1, lo que hace distinta a la combinación de producto-secador es el valor del coeficiente IPS generado en la regresión.

Se obtiene una curva normalizada con valores instantáneos de Φ y τ para un amplio rango de las variables tomadas en cuenta al iniciar el análisis. Un dato interesante es que al graficar las curvas para cualquier combinación de variables meteorológicas y del producto, se observa una marcada superposición sin importar las condiciones en las cuales se obtuvieron los datos. Por lo que se tiene una base equitativa para analizar al performance de cualquier secador.

El Índice de Performance del Secador (IPS), representa la capacidad de secado para una determinada configuración de secador, es la medida de su efectividad, depende de su diseño y de la cinética del secado. Si el IPS es alto (próximo o mayor que 1) indica que el secador es muy eficiente.

Se sugiere que las curvas de secado se analicen hasta un determinado contenido final de humedad de la muestra, así se define un punto de equiparación entre todos los secadores a comparar.

Para medir la confiabilidad del método se realiza el análisis de error relacionado con la curva de ajuste a los datos representados mediante la función que relaciona el contenido de humedad y el tiempo adimensionales. Se definen tres parámetros de comparación: Error de raíz media cuadrática (ERMC), error estándar (EE), y el coeficiente de correlación (r).

El método original elige una curva de entre un grupo de curvas que describan el comportamiento de un determinado secador con el mismo producto, esa curva es la que pasa por la región central del conjunto de todos los puntos de las curvas mencionadas y se la toma como representativa de esa configuración producto-secador, posteriormente se hace el análisis de error de esa curva con respecto a la curva ajustada matemáticamente. En este estudio solo se compara la curva ajustada con la experimental. Se espera que los valores de ERMC y EE sean bajos y que el valor de r sea alto para un buen ajuste.

3. Desarrollo de la experiencia

La reproducibilidad y el bajo costo de los materiales fueron los objetivos principales al momento de elegir un diseño en particular de secadero. Se optó por construir módulos acoplables para las etapas de colector, cámara de secado y sistema extractor.

La descripción de construcción de los tres módulos se presenta a continuación:

- El pre-calentador o colector de aire, fue construido con chapa galvanizada ondulada de 0,0002 m de espesor pintada de negro, de longitud 2,45 m y ancho 0,81m. El soporte de colector se construyó con madera de pino de sección cuadrada de 0,0254 m de ancho, en el interior se cubrió con plástico y el exterior con madera terciada de 0,004 m, se aisló con un espesor de 0,0254 m de lana de vidrio. La distancia entre la base interna del colector y la cubierta es de 0,1 m, colocando en la zona media

la chapa galvanizada apoyada en tres soportes de PVC. La cubierta trasparente se construyó con policarbonato alveolar con superficie anti-UV de 0,01 m de espesor, con las mismas dimensiones que la chapa galvanizada y enmarcado por perfil de aluminio. Se construyó de tal manera de que al montarse tuviese la inclinación igual a la latitud del lugar.

- La cámara de secado fue construida con una chapa de hierro de 0,0003 m de espesor, pintada de negro, enmarcada en madera de pino de sección cuadrada de 0,0254 m, cuyas dimensiones interiores son de 0,81m de ancho y 0,6 de profundidad. La altura que corresponde a la unión con el pre-calentador es de 0,3 m y la altura de la cara posterior es de 0,42 m, asegurando que el techo de la cámara tenga una inclinación igual que la latitud del lugar.

El exterior se cubrió de madera terciada de 0,004 m de espesor y se aisló con lana de vidrio de 0,0254 m. Se dispuso de dos techos desmontables, ambos de 0,81 m por 0,61 m. El primero se construyó en un marco de madera de pino de sección cuadrada de 0,0254 m de espesor cubierta en ambas caras con madera terciada de 0,004 m de espesor y en medio lana de vidrio de 0,0254 m. La segunda cubierta se construyó de una chapa de policarbonato alveolar anti-UV de 0,01 m de espesor con la misma superficie que la primera tapa enmarcada en perfil de aluminio.

- La chimenea fue construida en chapa de hierro de 0,002 m de espesor, en forma de cilindro, con un diámetro interior de 0,2 m, apoyada en cuatro soportes de madera de pino, tipo caballete. La chimenea presenta un codo a 0,3 m a partir de la salida de la cámara de secado y luego una porción vertical de 1,2 m de altura. Encima se colocó un extractor eólico constituido por dos aros metálicos ubicados uno encima de otro que aprisionan un conjunto de alabes paralelos, que producen vorticidad al paso de viento a través del espacio entre ellos, provocando una baja de presión en el interior y posterior extracción de aire.

Un gráfico que muestra cada uno de los componentes de los tres módulos se presenta en la [Figura 1](#).

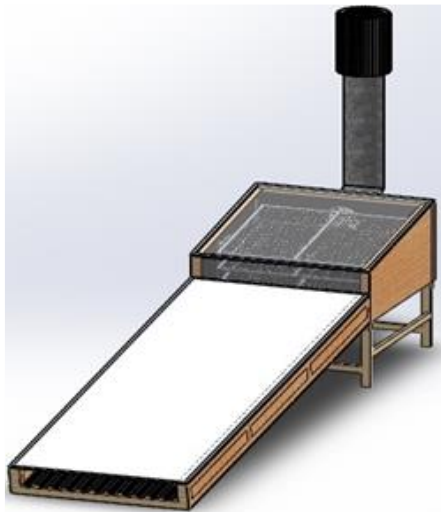


Figura 1. Esquema general de los módulos del secador.
Fuente: Los autores.

Se realizaron ensayos con productos que son característicos de la región de la costa norte colombiana, se dispuso un peso inicial de producto de alrededor de 5 kg. Algunas de las pruebas tardaron más de dos días para alcanzar la mínima cantidad de agua en el producto permitido por las condiciones atmosféricas de la región. Se dispusieron en tres bandejas dentro de la cámara de secado, midiendo masa de una porción testigo ubicada en la bandeja cada tiempo particular.

4. Resultados

4.1. Resultados de los ensayos

Se muestran los resultados de la pérdida de masa para cada producto en la [Figura 2](#). La figura muestra las variaciones de cantidad de agua presente en el producto durante el primer día de secado. Las pruebas se extendieron por varios días hasta alcanzar el valor de humedad de equilibrio de cada producto. El análisis del contenido de humedad durante el primer día de secado tiene que ver con la cantidad de agua no ligada presente en el producto. El ajuste lineal se hace bajo el supuesto de que la velocidad de evaporación es constante. Con una buena aproximación se puede observar en la figura valores de velocidad de evaporación que tienen que ver con el producto a secar.

La [Tabla 1](#) muestra un resumen de estas velocidades. Se observa que el mango maduro, por tener mayor cantidad de agua excedente, presenta una mayor razón de evaporación en contraste con el

Tabla 1. Velocidad de secado durante el primer día para cuatro distintos productos.

<i>Producto</i>	<i>Razón de evaporación (1/h)</i>
Yuca	0,0094
Cerdo	0,0086
Mango verde	0,0116
Mango maduro	0,0444

Fuente: Los autores.

cerdo que presenta poca cantidad de agua en su superficie al momento de introducirse en el secador.

Por otra parte, en las cuatro experiencias se puede observar que, en las dos experiencias con mango, el aporte de agua desde el producto a la cámara es importante durante el inicio de la experiencia, descendiendo hacia el final del primer día, en el secado de yuca el aporte es negativo durante todo el proceso, es decir, se necesitaría más producto para lograr un aporte significativo de agua en la salida. Con el cerdo se nota muy poco aporte de agua en el aire que pasa por la cámara. Siguiendo el criterio del análisis de las mediciones con yuca, se debería colocar mayor cantidad de producto para lograr un aporte considerable.

4.2. Resultados de aplicar la metodología IPS

Cuando se aplicó la metodología IPS se observó lo que predecía la propuesta de Singh y Kumar (2012), pues en primer lugar las curvas se obtuvieron en un proceso donde es evidente la difusión de agua desde el interior del producto hacia la superficie. Se aplicó a cada bandeja por separado y después al global del producto ubicado en la cámara de secado. Según se observa en la [Figura 3](#), los datos ajustados para el contenido de humedad y el tiempo adimensionales presentan coincidencia sin importar las condiciones a las cuales se realizaron. En la figura se observan los datos superpuestos y la curva de ajuste con el respectivo IPS para uno de los productos, pues la cantidad de curvas es grande.

Al aplicar el análisis por separado a cada una de las bandejas se observan los resultados mostrados en la [Tabla 2](#). Se observa una marcada tendencia en cada bandeja al comportamiento predicho por los autores del método IPS, a excepción de la tercera bandeja de yuca, pues el índice de performance es menor que 1, indicando un secado muy ineficiente.

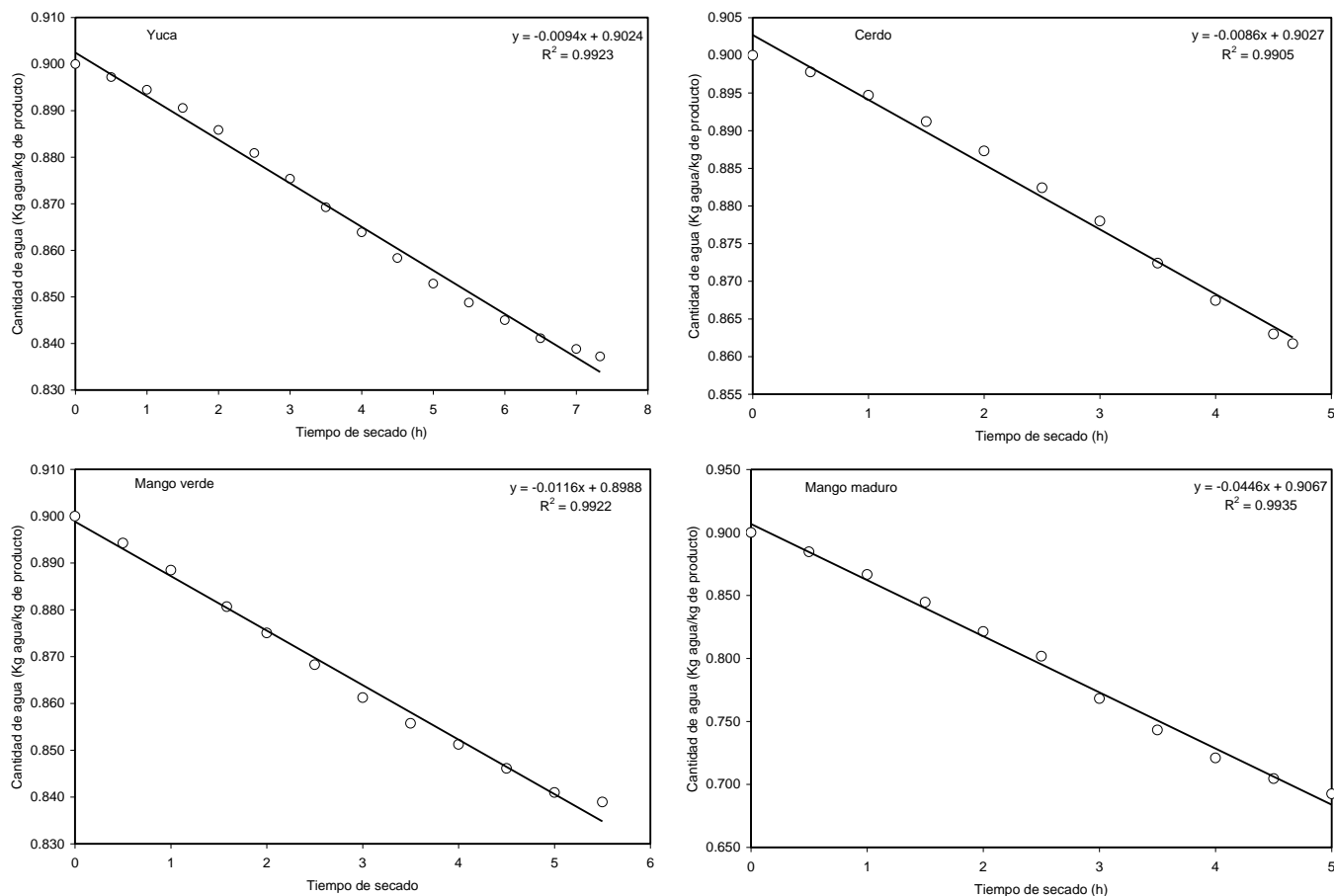


Figura 2. Cantidad de agua evaporada y ajuste lineal durante las pruebas con yuca, cerdo, mango verde y maduro.
Fuente: Los autores.

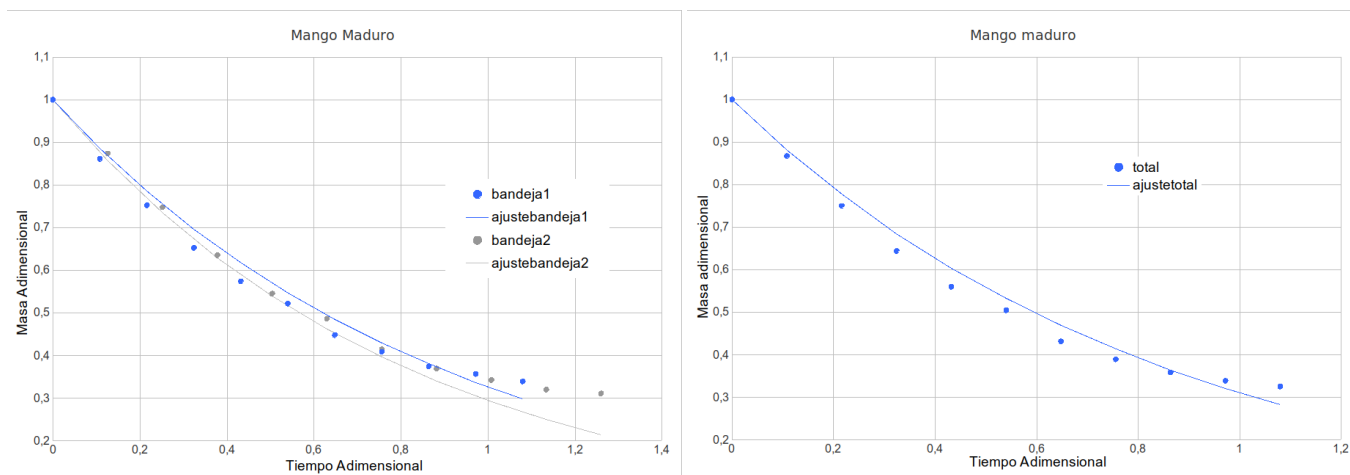


Figura 3. Masa adimensional vs tiempo adimensional para mango maduro.
Fuente: Los autores.

La tabla muestra claramente que el sombreado de las bandejas superiores a las bandejas inferiores es importante cuando la cantidad de agua presente no es significativa en la superficie del producto. A pesar de este dato anómalo, el comportamiento del producto bandeja por bandeja muestra la eficiencia deseada.

Si se aplica la metodología a todo el producto presente en la cámara de secado sin tener en cuenta la posición de bandeja, se obtiene lo mostrado en la [Tabla 3](#).

Los resultados de tabla muestran que el secado más eficiente es el de cerdo según el valor del parámetro IPS, pero los parámetros estadísticos muestran que el secado de mango maduro tiene una

Tabla 2. Resultados de aplicar la metodología IPS para cuatro distintos productos ubicados en bandejas.

<i>Producto</i>	<i>Bandeja</i>	<i>IPS</i>	<i>ERMC</i>	<i>EE</i>	<i>r</i>
<i>Cerdo</i>	1	1,5177	0,048	0,0084	0,973
	2	1,4131	0,035	0,0062	0,984
	3	1,3475	0,040	0,0070	0,973
<i>Mango verde</i>	1	1,1833	0,048	0,0096	0,983
	2	1,0541	0,049	0,0099	0,980
	3	1,0153	0,031	0,0062	0,992
<i>Mango maduro</i>	1	1,1189	0,030	0,0094	0,994
	2	1,2238	0,042	0,0132	0,996
<i>Yuca</i>	1	1,0129	0,036	0,0067	0,985
	2	1,4656	0,017	0,0032	0,995
	3	0,8613	0,028	0,0052	0,989

Fuente: Los autores.

Tabla 3. Resultados de aplicar la metodología IPS para cuatro distintos productos.

<i>Producto</i>	<i>IPS</i>	<i>ERMC</i>	<i>EE</i>	<i>r</i>
<i>Cerdo</i>	1,4242	0,041	0,0072	0,977
<i>Mango verde</i>	1,0844	0,043	0,0086	0,986
<i>Mango maduro</i>	1,1693	0,029	0,0092	0,994
<i>Yuca</i>	0,8437	0,026	0,0048	0,990

Fuente: Los autores.

mejor aproximación a la curva de masa adimensional predicha por el modelo. De nuevo se observa que el secado de yuca es el menos eficiente, pues el IPS es menor que 1. La razón se puede atribuir a la influencia de la tercera bandeja en este comportamiento.

5. Conclusiones

Se sometieron a análisis de la metodología IPS cuatro secados de productos característicos de la costa Caribe colombiana, con el objeto de identificar cuál de ellos tiene el mayor rendimiento. De las aplicaciones de la metodología a las bandejas por separado se observó que se hallan resultados satisfactorios debido a que existe un comportamiento similar en todas las bandejas a excepción de la yuca. Tal como lo predice el método, se debe tomar la parte de la curva de secado en donde la difusión de líquido del interior del producto sea preponderante, pues para cuando se evapora líquido no se puede realizar un buen ajuste. Cuando se aplica el método a la carga total de cámara, sin importar las bandejas se observa un comportamiento muy eficiente en tres productos y

el comportamiento se aleja del deseado por parte del secado con yuca. Se sugiere aumentar la carga inicial del producto para tener una carga de agua evaporada importante, pudiendo de esta manera aplicar la metodología IPS tal como lo predice.

6. Nomenclatura

Φ = Contenido de humedad referido a la masa inicial (adimensional).

M_t = Masa del producto al tiempo t (kg).

M_0 = Masa inicial del producto (kg).

k_0 = Factor de demora (adimensional).

k = Constante de secado (adimensional).

IPS = Índice de performance del secador (1/s).

τ = Tiempo de secado (adimensional).

Referencias

Belessiotis, V., Delyannis, E. *Solar drying. Solar Energy* 85 (8), pp. 1665–1691, (2011).

Singh S., Kumar S. *New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. Solar Energy* 86, 1981–1991, (2012).

Mujumdar A. S. *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, Inc, (1987).

Corvalan R, Roman R, Saravia L. *Ingeniería del secado solar*. CYTED-D, (1995).

Ekechukwu O.V. *Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory*. *Energy Convers Manage* 40(6), 593-613, (1999).

Ekechukwu O.V., Norton B. *Review of solar-energy drying systems. II: an overview of solar drying technology*. *Energy Convers Manage* 40(6), 615–55, (1999).

Ekechukwu O.V., Norton B. *Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications*. *Energy Convers Manage* 40 (6), 657-667, (1999).

Leon M.A., Kumar S., Bhattacharya S.C. *A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers*. *Renewable and Sustainable Energy* 6, 367–393, (2002).

Camaño J. A. , Rivera A. M. , Zapata J. E. *Efecto del espesor de película y de la ubicación de la muestra en un secador solar directo, sobre la cinética de secado de ensilado de vísceras de tilapia roja (Oreochromis sp)*. *Información Tecnológica*, Vol. 31(1), 53-66 (2020).

Villalba Vidales J. A., Arzola de la Peña N. *Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa*. *Ingeniería y Desarrollo*. Universidad del Norte. Vol. 33 n.º 2: 301-330, (2015).

Mealla Sánchez L.E. *Conclusiones respecto al rendimiento del secadero tipo invernadero De simple y doble cámara según dos metodologías de comparación*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 16, 03-47 – 03-54, (2012).

Dincer I., Dost S. *A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects*. *International Journal of Energy Research* 20, 531–539, (1996).