



Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 2763			
Título del proyecto: Evaluación comparativa de los métodos de ventana de refractancia y aire caliente sobre la calidad fisicoquímica, nutricional y aromática de fruta deshidratada. Aplicación en bananito (Musa Acuminata acuminata)			
Facultad o Instituto Académico: Ingeniería			
Departamento o Escuela: Ingeniería de alimentos			
Grupo (s) de investigación: GIPAB			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Alfredo Adolfo Ayala Aponte	10	10
Coinvestigadores	Angela María Ormazza Zapata (Tesisista de doctorado)	40	40
Otros participantes	Claudia Vargas (tesisista) Lisseth Casso H. Ana María Polanía (semilleros de investigación)	10	10

1. Resumen ejecutivo:

La Ventana de Refractancia™ (VR) desarrollada por MCD Technologies Inc. (Tacoma, Washington, USA) es una tecnología novedosa para secar eficientemente alimentos sensibles al calor utilizando la energía infrarroja del agua. El consumo de frutas y vegetales deshidratados, se ha incrementado debido a la concentración de nutrientes y compuestos de impacto sensorial como los compuestos volátiles responsables del aroma y vitaminas termosensibles como el ácido ascórbico. El propósito de este trabajo fue evaluar dos técnicas de secado VR y secado convectivo con aire caliente (SC) sobre las cinéticas de secado, propiedades fisicoquímicas (a_w , color, volumen, porosidad y capacidad de rehidratación), perfil aromático y Vitamina C de muestras de bananito. Para ello se emplearon 70, 80 y 90°C para la temperatura del agua en VR y 50, 60 y 70°C para el SC. Se usaron rodajas de bananito con dos espesores 2 y 4 mm y un diámetro de 25 mm. Adicionalmente, se calcularon los coeficientes de difusividad y de energía de activación, y los valores experimentales de humedad se ajustaron mediante los modelos de Newton, Page, Henderson-Pabis, Wang-Sing y Midilli. Los resultados mostraron que las cinéticas de secado por VR fueron más rápidas que las del SC; el tratamiento de 90°C con espesor 2mm por VR fue el más rápido alcanzando un contenido de humedad (CH) de 9.14 ± 0.31 b.s en 58 min, mientras que el tratamiento a 70°C con 2 mm de espesor deshidratado por el SC alcanzó esta misma humedad en 240 min. La a_w de las muestras tratadas por VR fue inferior a las secadas con aire para un mismo tiempo de secado, resultado coherente con las cinéticas de humedad. Al final del secado todos los tratamientos alcanzaron valores inferiores a 0.5 de a_w . La mayor retención de color, de vitamina C, de compuestos volátiles y de agua en la rehidrtación fue con el secado por VR, mientras que la porosidad y el volumen fue mayor con el secado convectivo. Con el incremento de la temperatura y menor espesor las cinéticas de secado fueron más rápidas en ambos métodos de secado, pero presentaron mayores pérdidas de

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.



calidad en el color, concentración de aromas y vitamina C, debido a la termosensibilidad del ácido ascórbico y de los aromas.

El modelo de Midilli fue el que mejor ajustó las cinéticas de secado con VR y el de Page fue en el SC, ya que los ajustes presentaron los valores más altos del coeficiente de correlación (R^2) y los valores más bajos de RMSE y X^2 . Los coeficientes de difusividad fueron del orden de 10^{-10} m²/s para espesores de 4mm y del orden de 10^{-11} m²/s para espesores de 2mm. De acuerdo a estos resultados la técnica de VR tiene un alto potencial para el procesamiento y conservación de banana bocadillo.

Palabras clave: Conservación de alimentos, color, rehidratación, ácido ascórbico, aromas, Difusividad.

Abstract

Window reflectance (RW) developed by MCD Technologies Inc. (Tacoma, Washington, USA) is an innovative technology to efficiently dry food heat sensitive infrared energy using water. Consuming fruits and vegetables dehydrated it has increased due to the concentration of nutrients and sensory impact compounds as volatile compounds responsible for flavor and heat-sensitive vitamins such as ascorbic acid. The purpose of this work was to evaluate two drying techniques (RW and CD), the temperature of 70, 80 and 90°C to RW and 50, 60 and 70°C for SC and slice thickness (2 and 4 mm) on drying kinetics and physicochemical properties (a_w , color, volume, porosity and rehydration) of dried baby banana slices refractance window™ and hot air as well as quantifying changes the vitamin C content and aromatic content at the end of drying of sliced baby banana dried both methods. In addition, diffusivity coefficients and activation energy were calculated and experimental moisture values were adjusted by Newton models, Page, Henderson-Pabis, Wang-Sing and Midilli. Results showed that the kinetics of drying VR were faster than the SC; treatment of 90 ° C with thickness 2mm by VR was the fastest to reach a moisture content (CH) of 9.14 ± 0.31 bs in 58 min, whereas treatment at 70 ° C with 2 mm thick dehydrated by SC reached this same moisture in 240 min. Actividad of water of the treated samples was less than VR air dried for the same drying time, thios result is consistent with the kinetics of moisture. At the end of drying all treatments reached values below 0.5 a_w . Most color retention, vitamin C, volatiles and water in the rehydration was dried with VR, while the porosity and the volume was higher with convective drying. With increasing temperature and reduced thickness the drying kinetics were faster in both methods of drying, but showed greater losses in quality in color, aroma concentration and vitamin C, due to the temperature sensitivity of ascorbic acid and aromas. Midilli model was the best adjusted the kinetic drying VR and model Page was better in the SC, because the settings had the highest values of the correlation coefficient (R^2) and the lowest values RMSE and X^2 . Diffusivity coefficients were of the order of 10^{-10} m²/s for 4 mm thickness and order of 10^{-11} m²/s for thicknesses of 2mm. According to these results, the VR technique has a high potential for the processing and conservation of banana.

2. Síntesis del proyecto:

Tema

Comparación de un método tradicional de secado (Aire caliente) con respecto a un método de secado novedoso y eficiente energéticamente (Ventana de refractancia) aplicado en bananito.

Objetivos: General y específicos

Objetivo general

-Evaluar comparativamente los métodos de secado de ventana de refractanciaTM y aire caliente sobre las cinéticas de sacado, propiedades fisicoquímicas, nutricionales y contenido de aromas de fruta deshidratada. Aplicación en bananito como matriz modelo.

Objetivos específicos

-Determinar el efecto de la temperatura de proceso y espesor de muestra sobre las cinéticas de secado y propiedades fisicoquímicas (Actividad de agua, color, volumen, porosidad y capacidad de rehidratación) de rodajas de bananito secados por ventana de refractanciaTM y aire caliente.

-Cuantificar los cambios del contenido de vitamina C y contenido aromático al final del proceso de secado de rodajas de bananito secados por ventana de refractanciaTM y aire caliente.

Materiales y métodos

1. Materia prima

Se emplearon frutos de bananito (*Musa Acuminata acuminata*) con un nivel de °Brix de 22-24. Las frutas se adquirieron en un mercado local y se refrigeraron hasta su uso (Augura, 2013). La fruta se lavó, peló y cortó en rodajas con dos espesores (2 y 4mm) y 25 mm de diámetro.

2. Tratamiento de inactivación enzimática de la materia prima

Las rodajas de bananito se sumergieron en una solución de ácido cítrico al 1% (p/p) durante 3 min, posteriormente se secaron con papel absorbente para retirar el exceso de solución (Atarés, Gallagher & Oliveira, 2011).

3. Diseño experimental

Para cada método de secado se realizó un diseño experimental independiente. En la tabla 1 se presenta el diseño para el secado convectivo con aire caliente, con un diseño factorial al azar de 2x3 (Dos espesores de rodaja y tres temperaturas), correspondientes a 6 tratamientos con 3 repeticiones para un total de total de 18 pruebas. La velocidad del aire fue de 1.0 m/s.

Tabla 1. Diseño factorial general al azar para secado convectivo con aire caliente.

Variables de proceso (Factores)	Niveles	Variables de respuesta
Espesor (mm)	2	Cinética de secado
	4	Color
Temperatura de aire (°C)	50	Actividad de agua
	60	Volumen
	70	Porosidad
		Capacidad de rehidratación
		Retención de vitamina C
		Retención de aromas

En la tabla 2 se presenta el diseño para el secado por ventana de refractancia, con un diseño factorial al azar de 2x3 (Dos espesores de rodaja y tres temperaturas), correspondientes a 6 tratamientos con 3 repeticiones para un total de total de 18 pruebas.

Tabla 2. Diseño factorial general al azar para secado con ventana de refractancia™.

VARIABLES DE PROCESO (FACTORES)	NIVELES	VARIABLES DE RESPUESTA
Espesor (mm)	2	Cinética de secado
	4	Color
Temperatura del agua (°C)	70	Actividad de agua
	80	Volumen
	90	Porosidad
		Capacidad de rehidratación
		Retención de vitamina C
		Retención de aromas

Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante ANOVAS, con una significancia de 0.05 y un intervalo de confianza de 95% ($p < 0.05$). Para ello se empleó el programa estadístico *Statgraphics Centurion XVI*. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

Adicional a las variables de respuesta de los diseños anteriores se calcularon los coeficientes de difusión del agua para cada tratamiento y los valores experimentales de secado se ajustaron mediante 5 modelos cinéticos de capa delgada.

4. Determinación del efecto de la temperatura de proceso y espesor de muestra sobre las cinéticas de secado y propiedades fisicoquímicas de rodajas de bananito secados por ventana de refractancia™ y aire caliente

4.1 Humedad

El contenido de humedad de las muestras se determinó por secado en un horno hasta peso constante a 60°C (AOAC, 1980).

4.2 Color

El color se determinó entre 400-780 nm, usando un espectrocolorímetro (HunterLab, ColorFlex, USA), utilizando como referencia el iluminante D65 y el observador 10° para obtener las coordenadas de color CIE-L*a*b*. Con las coordenadas obtenidas, se estimaron las diferencias de color (ΔE) entre las muestras en el tiempo inicial y en el tiempo (t) como se muestra en las ecuaciones 1-2. Se realizaron 3 medidas para cada muestra (Abonyi et al., 2002).

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (1)$$

$$C^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

4.3 Actividad de agua

La actividad de agua se midió con un higrómetro de punto de rocío (Decagón, AquaLab CX-1, USA) con una sensibilidad de 0,001 (Heredia, Barrera & Andrés, 2007; Lombard et al., 2008; Nuñez-Mancilla et al., 2012).

4.4 Cambio de volumen y porosidad

El volumen (V) se calculó como la razón entre el peso de la muestra y su densidad aparente (ρ_a), la cual se determinó por desplazamiento de volumen con un picnómetro usando agua destilada 20°C. Para el cálculo de la densidad real (ρ_r) se asumió que el puré es una mezcla pseudobinaria compuesta de agua y sólidos (Ecuación 3).

$$\rho_r = \frac{1}{\frac{x}{\rho_w} + \frac{1-x}{\rho_s}} \quad (3)$$

Donde x es la fracción másica del agua en la muestra. ρ_s y ρ_w se asumieron constantes e iguales a la densidad de los carbohidratos y la del agua pura, 1590 y 1000 Kg/m³, respectivamente (Lewis, 1993). La porosidad (ε) es la razón entre el volumen de aire presente en la muestra y su volumen total y se calculará a partir de la Ecuación 4 (Mayor & Sereno, 2004).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (4)$$

4.5 Capacidad de rehidratación

Las rodajas secas, con peso y humedad conocidos, se sumergieron en un baño de agua destilada con una relación de 3:1 a 28°C. A diferentes tiempos de rehidratación (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25 y 30 min) se extrajeron muestras del baño, retirando el exceso de agua superficial con toallas de papel, se pesaron para determinar el agua ganada (Marques *et al.*, 2007). La razón de rehidratación (RR) se calculó como el peso de agua ganada dividido por el peso de materia seca en cada muestra.

4.6 Cinética de secado para secado convectivo con aire caliente y secado con ventana de refractancia™

Se empleó un secador de bandejas (túnel), donde se colocaron las muestras de bananito y se hizo pasar a través de éstas aire caliente a tres temperaturas y velocidad de aire caliente constante que se midió con un anemómetro, la temperatura se registró con un termopar localizado en el centro geométrico de varias rodajas de bananito. Los experimentos se realizaron por triplicado. La cinética del secado convectivo con aire caliente se obtuvo graficando el contenido de humedad (base seca) (kg agua/kg materia seca) frente al tiempo.

Para el secado por VR se empleó un equipo para reproducir el principio de VR, el cual consiste en un tanque lleno con agua (0.6 m x 0.4 m) en cuya superficie se desliza una membrana de poliéster transparente al paso de la energía infrarroja (tipo Mylar™). La membrana se mantuvo estática y el agua calefactor con tres niveles de temperatura (70, 80 o 90°C), el agua se recirculó con un caudal de 2.74 L/min, haciendo contacto directo con la superficie interna de la membrana. Las muestras de bananito se colocaron sobre la membrana para su secado. La cinética del secado por VR se obtuvo graficando el contenido de humedad (base seca) (kg agua/kg materia seca) contra tiempo.

4.7 Difusividad efectiva de humedad

Se calculó a partir de la solución de la segunda ley de Fick de la difusión para una lámina infinita (espesor $2l$) deshidratada osmóticamente por ambos lados, con los respectivos supuestos y condiciones de contorno, aplicando las ecuaciones 5 y 6 para la transferencia de agua (Rastogi y Raghavarao, 1997).

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 F_0 \right] \quad (5)$$

$$F_0 = \frac{D_{ef} t}{l^2} \quad (6)$$

Donde M es la relación adimensional de humedad; los subíndices, 0, t y ∞ representan las humedades en el tiempo 0, t y en el equilibrio; D_{ew} es la difusividad efectiva del agua, l es el espesor medio de la placa; F_{ow} es el número de Fourier para la difusión. El valor de M^∞ , para cada condición, se estimó a partir de las medidas experimentalmente de las curvas de deshidratación, como el valor de M en el equilibrio (cuando el cambio en M es menor que 0,1). La relación de agua difundida (M) se calculó a partir de los valores determinados de contenido de agua (M) durante un período de tiempo (t) y se obtuvo el número de Fourier (Ecuación 5). Los valores del número de Fourier obtenidos para diferentes valores de tiempo de inmersión (t) se representaron de acuerdo con la ecuación 6 y los valores de difusividad efectiva se obtuvieron a partir de la pendiente (Ecuación 6) (Rastogi & Raghavarao, 1997).

4.8 Modelamiento de los procesos de secado

Se utilizaron 5 modelos matemáticos para ajustar los valores experimentales del secado convectivo con aire caliente y el secado por VR (Ecuación 7–11, tabla 3). Estos modelos son ampliamente usados en la literatura para alimentos (Akgun & Doymaz, 2005; Wang et al., 2007b; Mundada, Hathan & Maske, 2010).

Tabla 3. Modelos matemáticos para secado convectivo con aire caliente y el secado por ventana de refractancia™

Nombre	Modelo	
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(7)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(8)
Henderson y Pebis	$MR = A \cdot \exp(-kt)$	(9)
Wang y Singh	$MR = 1 + At + Bt^2$	(10)
Midilli	$MR = A \cdot \exp(-Kt^n) + Bt$	(11)

Los parámetros o constantes A , B , C , k y n asociados a los modelos a utilizar fueron estimados mediante una regresión no lineal entre m y a_w con el software *Mathlab R2009a*, con el fin de seleccionar la mejor correlación y mejorar el análisis de los datos experimentales. Para estos modelos matemáticos la variable definida como MR corresponde a la relación adimensional de humedad empleada normalmente (Ecuación 12).

$$MR = \frac{(M - M_e)}{M_0 - M_e} \quad (12)$$

Donde M es el contenido de humedad del producto a cada momento, M_0 es el contenido de humedad inicial del producto y M_e es el contenido de humedad de equilibrio. Los valores de M_e son relativamente pequeños comparados con M o M_0 para largos tiempos de secado, de este modo $MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e)$ puede ser simplificado a $MR = M/M_0$ (Akgun & Doymaz, 2005). Como criterio para evaluar la calidad y el mejor ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales de secado, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio relativo (%E) (Ecuación 13).

$$(\%)E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_e - X_p|}{X_e} \quad (13)$$

Donde: X_e es valor experimental; X_p es valor predicho de cada modelo; y n es el número de observaciones. Los valores de R^2 más altos y los valores más bajos de MRE % representan el mejor ajuste del modelo matemático a los datos experimentales. Si el valor de $E < 5$ indica un excelente ajuste del modelo, al igual que un R^2 cercano a 1; mientras que valores mayores que 10 indican un ajuste pobre (Azoubel & Murr, 2004; Mundada, Hathan & Maske, 2010)



5. Cuantificación de los cambios del contenido de vitamina C y contenido aromático al final del proceso de secado de rodajas de bananito secados por ventana de refractancia™ y aire caliente

5.1 Medición del perfil aromático

Los volátiles se midieron de la siguiente forma: Se tomaron 10 g de muestra en un erlenmeyer y se selló con varias capas de plástico adhesivo. El matraz sellado se dejó durante 10 min sellado para que el espacio de cabeza se saturara con los volátiles de la fruta. Se introdujo una fibra de microextracción en fase sólida (SPME) con dos revestimientos diferentes (50/30 mmDVB / Carboxen™ / PDMS StabFlex™), (Supelco Co., Bellefonte, EE.UU.). Se insertó por 30 min en el espacio de cabeza del vial para recoger los compuestos volátiles. El tipo de fibra afecta a la selectividad de la extracción y mediante el uso de una fibra de tipo mixto se obtuvo analitos no polares (PDMS) y polares (DVB). La fibra de SPME se introdujo en el inyector del cromatógrafo de gases (GC) (6890N, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, EE.UU.) acoplado a un espectrómetro cuadrupolar sola masa (masa selectiva detector, Agilent). La fibra fue preacondicionada a 250 ° C durante 1 hora. La columna capilar estaba recubierta de difenilpolisiloxano (5%) dimetilpolisiloxano (95%) (Optima-5-MS, 30 m x 0,25 mm DI con una película de 0,25 mm de espesor, Macherey-Nagel, Duren, Alemania). La fuente de iones y el campo del espectrómetro de masas se mantuvieron en 230°C y 150°C, respectivamente. La energía de ionización fue de 70eV, con un rango de exploración de 10-350 m / z. El gas portador utilizado fue helio a un flujo de 1,2 mL/min (63,1kPa). La temperatura del puerto de inyección se mantuvo a 250°C. La temperatura inicial del horno del GC inicial se programó a 40°C y aumentó a 125°C a una velocidad de 4°C/min y posteriormente se incrementó a 240°C a una velocidad de 50°C/min y se mantuvo así durante 5 min. El tiempo total de análisis fue 28,55 min. Los volátiles totales de la muestra constituyen la suma de todas las áreas de los picos del cromatograma y la abundancia relativa de los volátiles se obtuvo dividiendo el área de cada pico entre la sumatoria del área total. Los compuestos volátiles se identificaron mediante la comparación de los espectros de masa de referencia de la biblioteca NIST (NIST98, versión 2,0, Gaithersburg, EE.UU.) (Wang et al., 2007a; Vermeir et al., 2009).

5.2 Determinación del contenido de vitamina C

El ácido ascórbico se extrajo (bajo luz tenue) de muestras de banano mediante la mezcla de 40g de tejido de la fruta y 100ml de una solución fría de ácido MPA-acético (30g MPA, 0,5g EDTA, y 80ml de ácido acético glacial diluido en 1 litro con agua destilada) en una licuadora preenfriada, de acero inoxidable por 3 min. La suspensión se centrifugó durante 15 min a 10.000 rpm en una centrifuga fría (2-4°C), y el sobrenadante fue recogido. Las muestras (5ml) se pasaron a través de una fase C-18 SepPaks preacondicionada con 2 ml de ACN seguido de la adición de 5 ml agua destilada. Duplicados de las muestras se filtraron a través membranas de 0,22 µm y se depositaron en viales ámbar de HPLC. Todas las muestras se mantuvieron en hielo, y el análisis de HPLC se realizó en el mismo día de las extracciones. El ácido ascórbico se analizó por inyección de 5-15µl de la muestra en un cromatógrafo líquido Agilent 1100 series (Agilent Technologies, Wilmington, DE), con 0,2M NaH₂PO₄, pH 2,14 como fase móvil, y una columna PLRP-S (2.1x250 mm, tamaño de partícula 5µm; Polymer Laboratories, Amherst, MA) como fase estacionaria, seguido por un detector Agilent de arreglo de diodos fijado a 254 nm. Con un flujo de 0,25 ml/min y la corrida con una duración de 8 min. El automuestreador termostatzado y el compartimento de la columna estaban a 4°C. Los patrones de ácido ascórbico van de 25 a 100 µg/ml se utilizaron para conformar la curva de calibración, y los picos de la muestra se identificaron según los tiempo de retención de HPLC y los espectros de absorbancia en comparación con los patrones. Para las pruebas de recuperación, las muestras se enriquecieron con soluciones patrón antes de la extracción. La recuperación de la extracción de ácido ascórbico y el nivel mínimo de detección de HPLC fue de 0,05 mg. Los valores de vitamina C se expresaron como mg/100 g peso fruta fresco (Wall, 2006).



Resultados y análisis

Objetivo específico 1: Determinar el efecto de la temperatura de proceso y espesor de muestra sobre las cinéticas de secado y propiedades fisicoquímicas (Actividad de agua, color, volumen, porosidad y capacidad de rehidratación) de rodajas de bananito secados por ventana de refractancia™ y aire caliente.

Cinética de secado

En la figura 1 se observan las cinéticas de secado por VR y SC a 2 y 4 mm de espesor. El contenido de humedad inicial promedio de las muestras frescas fue de 2,5 g agua/g m.s. Las cinéticas de secado por VR fueron significativamente ($p < 0.05$) más rápidas respecto a las de SC independientemente del espesor y de la temperatura; lo que significa que por VR se emplea menos tiempo para alcanzar un contenido de humedad determinado. Estos menores tiempos en VR son debidos posiblemente por su mecanismo de transferencia de calor (combinación energía infrarroja, convección y conducción), parece que este mecanismo de transferencia ejerce mayor fuerza impulsora que el mecanismo predominante en el SC. De acuerdo a lo anterior, la técnica de VR es un proceso más eficiente que el SC debido al incremento sustancial en la transferencia de calor por acción de la energía infrarroja del agua, lo cual ocasiona que disminuyan los tiempos de secado y consecuentemente el consumo energético del proceso (Ocoró-Zamora y Ayala-Aponte, 2013). Este mismo comportamiento fue observado por Ochoa-Martínez et al., (2012) y Jimenez et al., (2014).

Puede notarse que con el incremento de temperatura, en ambos métodos de secado, se reduce significativamente ($p < 0.05$) el tiempo de proceso para alcanzar un mismo nivel de humedad; de otra manera se puede decir que se presenta mayor reducción de humedad a un mismo tiempo de secado. Este comportamiento es debido al incremento de la transferencia de calor por el mayor gradiente de temperatura entre la fuente de calor (aire para SC y agua para VR) y las muestras de banano, favoreciendo una rápida migración del agua en el alimento (Sacilik y Elicin, 2006). Este mismo comportamiento fue observado en el secado de banano (Baini y Langrish, 2007; Da Silva et al., 2012; Corzo et al., 2008; Thuwapanichayanan et al., 2011).

El factor espesor mostró un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el contenido de humedad; a menor espesor mayor fue la pérdida de agua en ambos métodos de secado, porque a menor espesor se disminuye la distancia para recorrer por las moléculas de agua antes de salir de la muestra, y de esta forma, también se aumenta la superficie de transferencia de calor. Resultados similares fueron reportados por Ochoa-Martínez et al., (2012).

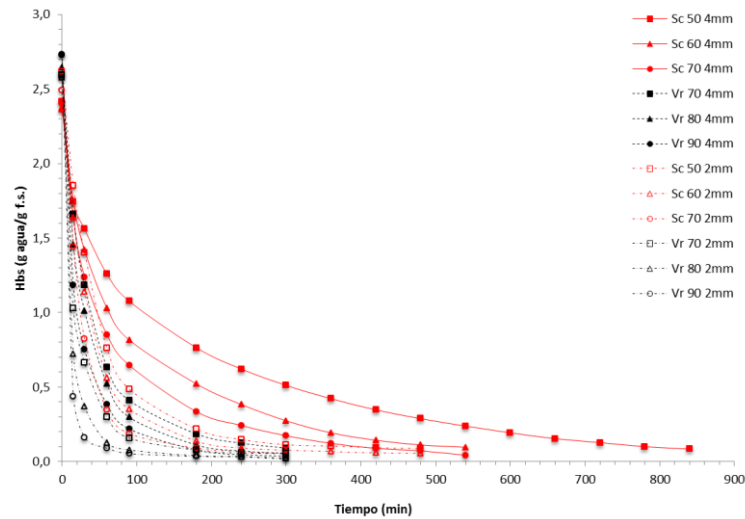


Figura 1. Cinética de secado de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Actividad de agua

El valor inicial de la a_w para las muestras frescas de banano bocadillo fue de $0,8875 \pm 0,0285$. Como se esperaba durante el tiempo de proceso la a_w disminuyó en todos los tratamientos independientemente de la temperatura y espesor, alcanzado al final del secado valores inferiores a 0.55; lo cual indica que la fruta deshidratada es estable durante el almacenamiento contra ataque de microorganismos ($a_w < 0,6$) ya que se limita la disponibilidad de agua (Labuza y Hyman, 1998). Este comportamiento de la a_w es consistente con el comportamiento de las cinéticas de secado por ambos métodos y a los espesores evaluados (Figura 2). Se observa que con el incremento de la temperatura de proceso se disminuye el valor de la a_w , debido a la influencia de la alta temperatura en eliminar más agua de la fruta.

En general se observó que para un mismo tiempo de proceso las muestras secadas por VR alcanzaron a_w inferiores a las obtenidas por SC, siendo las muestras de 2mm de espesor las de menor valor, debido a la mayor velocidad de secado en las muestras más delgadas sumado a la eficiencia en el secado de la VR. Resultados similares fueron reportados por Ochoa-Martínez et al., (2012) y Jimenez et al., (2014).

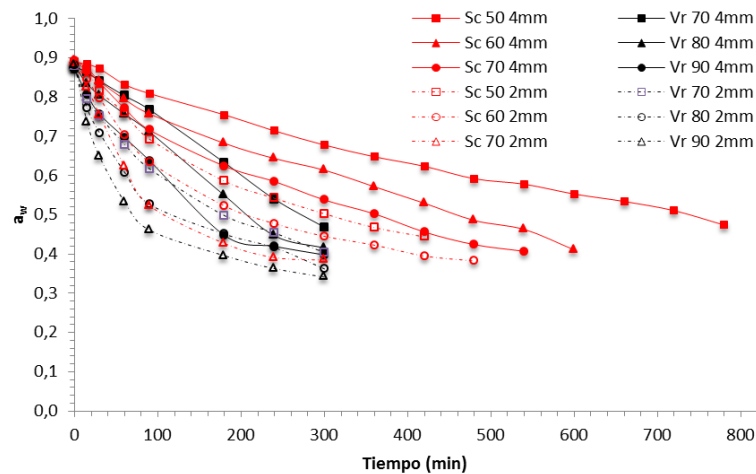


Figura 2. Actividad de agua de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Color

La luminosidad (L^*) de las muestras depende tanto del método de secado, la temperatura y del espesor de la muestra (Figura 3^a y b). Las desviaciones estándar en todos los tratamientos variaron entre 0.14 y 0.79. Un valor alto de L^* significa mayor claridad, un valor bajo indica oscurecimiento o pardeamiento. Los resultados mostraron que la luminosidad de las muestras por VR fue superior a los del SC, debido posiblemente que en VR se presenta mayor velocidad de secado y menor temperatura en el centro geométrico de la muestra (Ochoa et al., 2012); este hecho hace que cuanto más prolongado es el secado mayor es la degradación de los pigmentos vegetales. En el SC la temperatura de la muestra es superior a la procesada en VR, debido al contacto directo de la rodaja con el aire caliente, mientras que en VR es menor porque la membrana de poliéster ofrece un aislamiento moderado complementado con la alta velocidad de transferencia de calor por radiación, ofreciendo mayor protección térmica de los pigmentos vegetales y disminución en las reacciones de pardeamiento y caramelización en la muestra tratada.

Las muestras con menor espesor presentaron mayor descenso de la luminosidad en ambos métodos de secado, lo que significa mayor oscurecimiento. Este resultado puede estar asociado a la alteración de los pigmentos vegetales por la temperatura, debido a que en su centro geométrico se presenta mayor temperatura (Ochoa et al., 2012; Edoun et al., 2014).

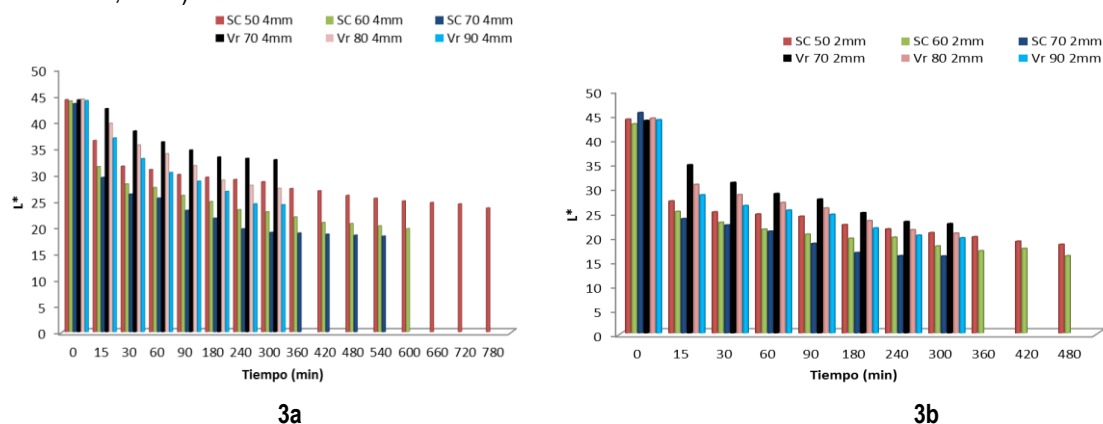


Figura 3. Luminosidad de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 mm (3a) y 2mm (3b)

La figura 4 presenta los cambios de Pureza de color de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 mm (4a) y 2mm (4b). La variación estándar (Barras de error) varió entre 2.1 y 3.5 en el todo el diseño experimental. Puede notarse en al figuras 4a y 4b que las muestras tratadas con aire caliente, en ambos espesores, presentaron ligeramente mayores valores de pureza de color frente a las de VR, pero no fue estadísticamente significativo ($p>0.05$). También se notó que C^* aumentó ligeramente con el incremento de la temperatura en todos los tratamientos evaluados. Con respecto al espesor, el cromatismo fue también ligeramente superior en las más delgadas. El aumento del cromatismo está asociado con la concentración de pigmentos vegetales a medida que el agua es evaporada durante el secado y por la prolongación del tiempo de secado (Edoun et al., 2014).

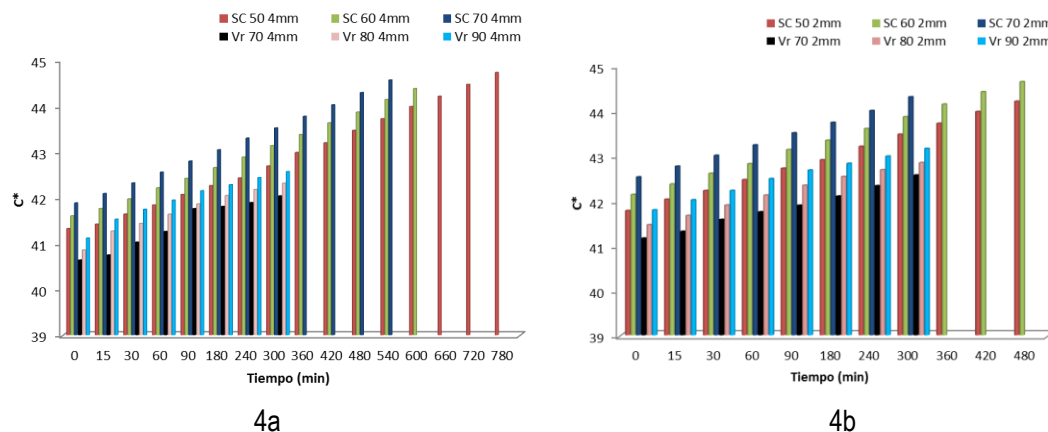


Figura 4. Cambios de Pureza de color (C^*) de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 mm (4a) y 2mm (4b)

El cambio total de color ΔE de fruta se muestra la figura 5(a y b), las variaciones estándar en todo el diseño experimental variaron entre 1.9 y 2.87. Se evidencia en todos los tratamientos cambios significativos del cambio total de color durante el secado de bananito en ambos métodos. Estos cambios de color, son considerados alteraciones desde el punto de calidad por efecto del secado (Lewicki y Jakubczyk, 2004), del método y de las variables de proceso aplicadas (Krokida y Maroulis, 1997). Los tratamientos secados por VR (5^a y b) presentaron significativamente ($p<0.05$) menores cambios de color (ΔE) respecto a los de SC, lo cual indica que el secado con VR presenta menor degradación de pigmentos vegetales comparado con el SC (5ayb). La técnica de VR ha presentado excelentes resultados en la retención del color en diversos alimentos, como mango en polvo (Caparino et al., 2012), espárragos (Nindo et al., 2003), fresas y zanahorias (Abonyi et al., 2002), comparado con otros procesos de secado como la liofilización y el secado por aspersion. Los mayores cambios totales de color en las muestras tratadas por el SC están asociados a mayor degradación de los pigmentos, debido a la mayor temperatura alcanzada en la muestra, explicado en el análisis de la luminosidad (L^*).

Los cambios totales de color fueron superiores en los tratamientos con mayor temperatura y menor espesor en ambos métodos de secado.

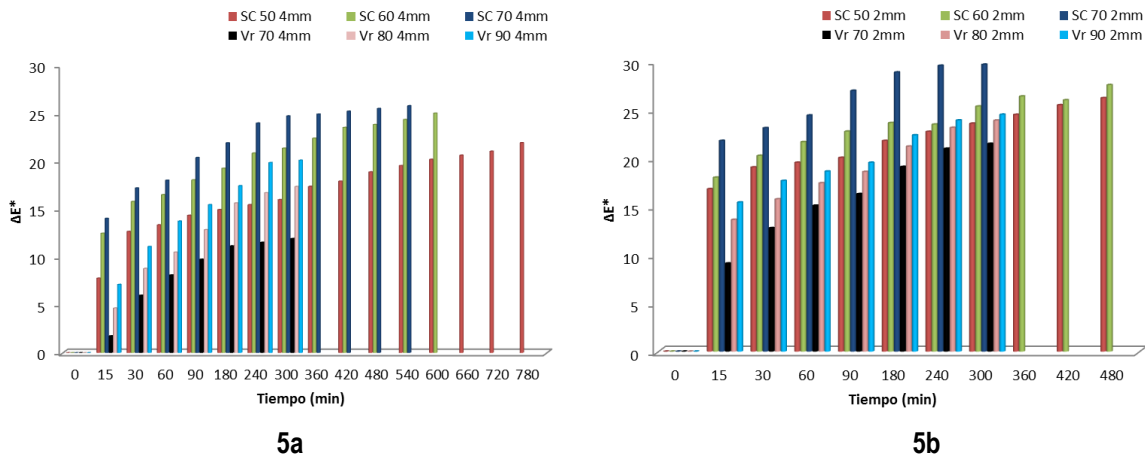


Figura 5. ΔE^* de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 mm (5a) y 2mm (5b)

Volumen

La cinética de volumen (V) muestra una clara diferencia entre los tratamientos secados por VR y SC (Figura 6); notándose que las muestras tratadas por SC presentaron significativamente ($p < 0.05$) los menores valores, indicando menor encogimiento durante el proceso. Este comportamiento puede ser atribuido a que las muestras durante el SC presentan menor daño estructural por el contacto directo del aire caliente con la muestra; esta misma tendencia fue observada en mango deshidratado por SC y VR (Ochoa-Martínez et al., 2012). Por otro lado, las mayores pérdidas de volumen en las muestras tratadas por VR (Figuras 6 ayb), puede ser debido a la rápida movilidad del agua durante el secado en dirección axial (espesor), recorriendo menos distancia (Thuwapanichayanan et al., 2011), por efecto del gradiente de humedad que genera tensiones en la estructura celular, ocasionando cambios físicos irreversibles sobre la forma y la dimensión de las rodajas (Mayor y Sereno, 2004; Pan et al., 2008). Al haber eliminación de humedad, quedan espacios en la estructura que se ajustan paralelamente, desarrollando una nueva estructura guiada por fenómenos de contracción y relajación (Ketelaars et al., 1992), porque siempre que se seca un alimento su volumen disminuye (Thuwapanichayanan et al., 2011).

El encogimiento o pérdida de volumen fue menor significativamente ($p < 0.05$) a mayor espesor (4mm) debido a que la cinética de secado fue más lenta. Mientras que la pérdida de V fue mayor con el incremento de la temperatura, lo cual puede ser indicador de daño estructural, producto del colapso del material por la salida rápida del agua durante el secado (Udomkun et al., 2014). El encogimiento de las muestras de bananito puede estar asociado a las tensiones o estrés en la matriz celular de bananito por efecto de la pérdida de agua durante el secado (Ketelaars et al., 1992).

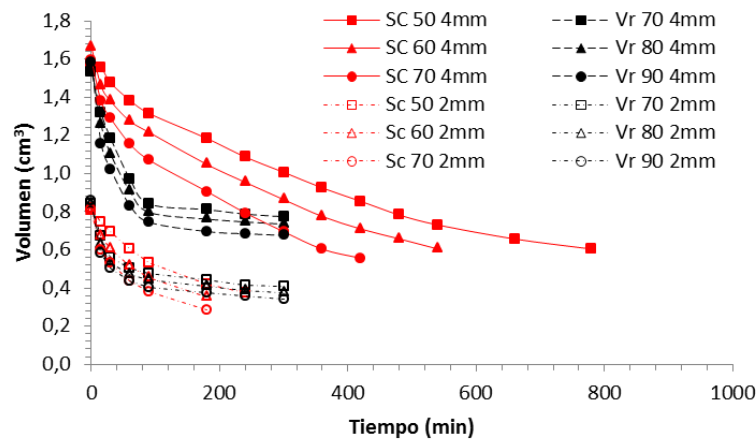


Figura 6. Volumen de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Porosidad

La figura 7 muestra los cambios de porosidad de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm. Las desviaciones estándar en todo el experimento de los tratamientos variaron entre 0.05 y 0.1. El valor inicial de porosidad de bananito varió entre 6 y 8%, valor similar al reportado por Yan et al. (2008). Todos los tratamientos presentaron un aumento significativo ($p < 0,05$) de la porosidad con la disminución del contenido de humedad ($p < 0,05$) y con el incremento de la temperatura de secado ($p < 0,05$). Este incremento de la porosidad se debe a la eliminación del agua, el cual se crean fracciones vacías entre capilares y otras estructuras celulares. Puede explicarse también que este incremento de la porosidad se genera por el estrés ocasionado durante el encogimiento debido posiblemente a la evolución del vapor de agua dentro de las muestras, aumentando la presión interna e incrementando la ruptura del tejido del banano (Thuwapanichayanan et al., 2011; Prachayawarakorn et al., 2008). Resultados similares se observaron en zanahoria (Liu et al. 2012) y en manzana (Joardder et al., 2015).

Al comparar los métodos SC y VR, se observa un aumento significativo ($p < 0,05$) de la porosidad en las muestras tratadas con SC. Un comportamiento opuesto fue reportado por Ochoa-Martínez et al. (2012), al comparar la porosidad de rodajas de mango por VR y SC. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en la sección anterior del volumen, ya que las muestras tratadas por SC presentaron mayor volumen que las de VR, por lo que posiblemente el colapso estructural fue menor. En las muestras tratadas con aire caliente es probable que parte del aire reemplace las moléculas líquidas de agua o dejen en la estructura vegetal la presencia de microcanales por donde salieron de manera lenta las moléculas de agua libre contenida en el material. Otra explicación, puede ser atribuido al aumento de la temperatura interna de la muestra por contacto directo del aire con el banano, generando estructuras porosas, como fue observado en rodajas de banano secadas por aire caliente a 70, 80, 90, 100°C y superiores (Boudhrioua et al., 2002).

En cuanto al efecto del espesor, las muestras de 2mm presentaron mayores valores de porosidad respecto a las muestras más gruesas, debido posiblemente a la mayor velocidad de salida del agua en las muestras más delgadas ocasionando mayor formación de microcanales o espacios intracelulares con aire ocluido por efecto de una mayor cinética de secado.

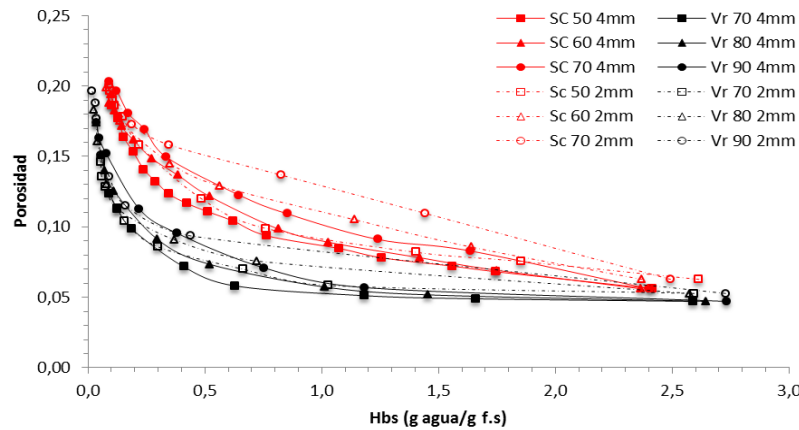


Figura 7. Porosidad de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Capacidad de rehidratación (índice rehidratación)

La evolución del índice de rehidratación (IR) de muestras de bananito secadas por VR y SC se muestra en la figura 8. Las variaciones estándar variaron entre 0.06y 0.09. Las muestras tratadas por VR fueron las que presentaron mayor capacidad de rehidratación independientemente de la temperatura y del espesor, debido posiblemente a menor daño estructural por efecto del moderado tratamiento térmico aplicado por VR con tiempos cortos de secado. Un comportamiento similar fue reportado por Marques et. al., (2009) y Krokida y Maroulis (2000). La disminución en la capacidad de rehidratación es un proceso irreversible debido a la ruptura celular y desconfiguración estructural, disminución de capilares y formación de estructuras densas causadas, por el tratamiento térmico y el encogimiento de la muestra con reducida capacidad hidrofílica (Jayaraman et al., 1990; Krokida y Philippopoulos, 2005; Lewicki, 2006; Atarés et al., 2008). Durante la eliminación de agua durante el secado, se generan tensiones en la estructura celular que con tiempos prolongados de secado ocasiona un colapso estructural en forma y configuración de poros y compartimientos de la pared celular del material deshidratado (Lin et al., 1998; Marques et al., 2009; Mayor y Sereno, 2004; Pan et al., 2008; Sagar y Kumar, 2010).

Las muestras más delgadas (2 mm) mostraron mayor capacidad de rehidratación o IR, debido a que son más porosas y presentan mayores espacios para ser ocupados nuevamente por el agua. En todos los tratamientos evaluados se observó que el IR disminuye con el aumento de la temperatura de secado, dado que las bajas temperaturas de secado preservan las cualidades físicas y estructurales de los alimentos (Marques et al., 2006; Seremet et al., 2015); adicionalmente los cambios estructurales causados por el encogimiento producto del secado constituyen una de las principales razones para la pérdida de calidad sobre las propiedades estructurales de un producto deshidratado (Prachayawarakorn et al., 2008; Xiao et al., 2015).

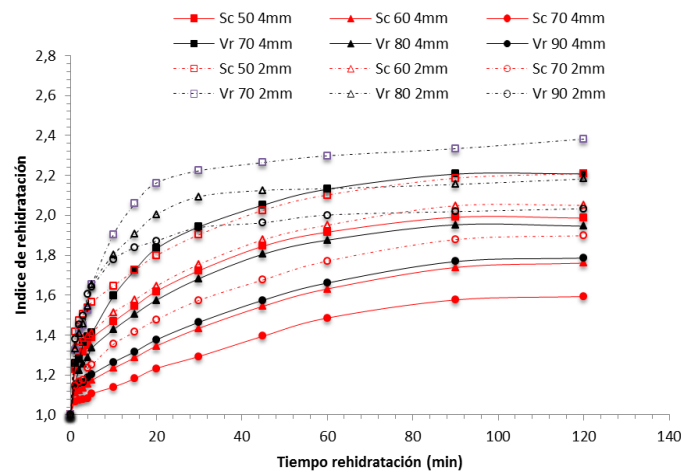


Figura 8. Capacidad de rehidratación de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

El índice de rehidratación refleja el daño a nivel estructural sufrido en alimentos deshidratados por efecto del tratamiento térmico (Sacilik y Elicin, 2006; Seremet et al., 2015). Varios autores como Witrowa-Rajchert y Lewicki (2006), argumentan que en los procesos de rehidratación se presentan 3 procesos simultáneos que involucran la absorción de agua dentro del material seco, el hinchamiento de la estructura y la lixiviación de sólidos solubles desde el material vegetal.

Difusividad efectiva del agua

La figura 9 presenta los coeficientes de difusividad efectiva del agua de muestras de bananito frente al CH durante el secado por VR y SC. Los valores promedio del coeficiente de difusión efectiva del agua se resumen en la tabla 4. Puede notarse que los coeficientes de difusión de las muestras secadas con VR en los dos espesores (4 y 2 mm) son superiores a las correspondientes en SC, resultado coherente con las altas velocidades de secado que se observaron en las cinéticas de VR. Estos valores promedio coinciden con los reportados en el secado de frutas (Lagunez-Rivera et al., 2007; Kurozawa et al., 2012). Se nota también que la difusividad se incrementa con el aumento de la temperatura de proceso, que actúa como fuerza impulsora; lo cual significa que se favorece la transferencia de masa con mayor temperatura debido a un aumento en el número de moléculas que se desplazan hacia la superficie del material que se está secando (Toğrul & Pehlivan, 2003).

Tabla 4. Coeficientes de difusividad efectiva promedio de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

T° VR	De Vr 4mm	De Vr 2mm	T° SC	De Sc 4mm	De Sc 2mm
70	1,49E-10	4,2E-11	50	1,33E-10	3,67E-11
80	1,55E-10	4,8E-11	60	1,36E-10	3,76E-11
90	1,67E-10	5,5E-11	70	1,41E-10	4,03E-11

Los valores de difusividad efectiva del agua reportados en el presente trabajo son del orden de 10^{-10} m²/s que

corresponde a valores típicos encontrados en el secado de productos agrícolas (Dissa et al., 2008; Kurozawa et al., 2012; Lagunez-Rivera et al., 2007).

Las altas temperaturas de secado aceleran las moléculas de agua, evaporándose más rápidamente, ocasionando una disminución más rápida del contenido de humedad en el banano bocadillo y un aumento en el valor del coeficiente difusivo del agua. Por tratarse de un secado isotérmico el valor del coeficiente difusivo disminuyó con el contenido de humedad del producto durante ambos procesos de secado (Thuwapanichayanan et al., 2011).

El coeficiente de difusividad efectiva del agua fue mayor en las muestras con mayor espesor (4mm), debido a que presentaron menor encogimiento. Resultados similares fueron reportados por Fernando *et al.*, (2008) y Ochoa-Martínez *et al.*, (2012).

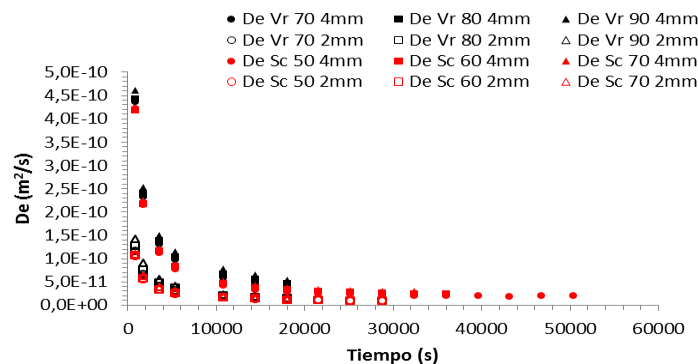


Figura 9. Coeficientes de difusividad efectiva del agua de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Energía de activación

En la tabla 5 se observan las diferencias entre la energía de activación (E_a) de los tratamientos estudiados, encontrándose que es inferior para los tratamientos con VR. Un valor bajo en la energía de activación indica la facilidad de las moléculas de agua para difundirse fuera del material vegetal durante el secado.

Las muestras más delgadas mostraron menor valor de E_a , debido a que las cinéticas de secado son más rápidas en muestras con menor espesor. De otra manera puede decirse que las muestras de mayor espesor requieren mayor E_a , lo cual significa que la resistencia interna es mayor a causa del menor encogimiento. Resultados similares a los obtenidos con este parámetros fueron reportados por Doymaz & Ismail, (2011), Dissa et al., (2008) y Kaya et al., (2010). La energía de activación fue calculada a partir de la pendiente y el intercepto de las linealizaciones representadas en la figura 10.

Tabla 5. Energía de activación de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Tratamiento	E_a (KJ/mol)
Vr 4mm	30,074
Vr 2mm	20,085
Sc 4mm	40,419
Sc 2mm	25,430

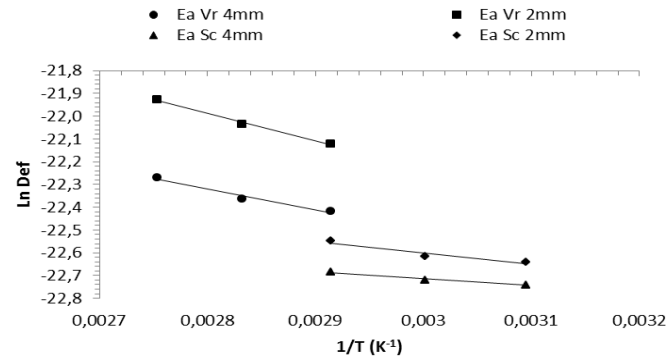


Figura 10. Relación tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y el recíproco de la temperatura absoluta de muestras de bananito secadas por VR y SC a 4 y 2 mm

Modelación de cinéticas de secado

Los parámetros estimados para la modelación del secado de rodajas de bananito por VR y SC a 2 y 4mm se presentan en las tablas 6 y 7 respectivamente. Los modelos evaluados fueron Newton, Page, Henderson-Pabis, Wang-Sing y Midilli, incluyendo los criterios para la evaluación de la bondad del ajuste, R^2 , E%, RMSE y X^2 .

Se observó un buen ajuste de todos los modelos evaluados, siendo el modelo de Midilli el mejor para las muestras tratadas con VR y el de Page para los de SC. La representación gráfica de los ajustes para VR y SC se observan respectivamente en las figuras 11 y 12. El parámetro k se incrementa con el aumento de la temperatura del secado y con menor espesor de muestra. De acuerdo con la literatura científica, es frecuente que k sea dependiente de la temperatura, de modo que un incremento de k se relacione con un aumento en la temperatura del producto durante el proceso (Vega-Gálvez *et al.*, 2011). Resultados similares fueron reportados por Toğrul, (2005), Jiménez *et al.*, (2014), Ortiz y Ochoa-Martínez, (2014) y Schössler *et al.*, (2012).

Tabla 6. Modelación de cinéticas de secado de muestras de bananito por VR 4 y 2 mm

Modelo	Constantes	Temperatura secado VR 4mm			Temperatura secado VR 2mm		
		60°C	70°C	80°C	70°C	80°C	90°C
Newton	k	0,8241	1,5820	2,6220	2,3230	4,7090	6,9240
	R ²	0,9882	0,9957	0,9943	0,9728	0,9929	0,9914
	E(%)	0,1265	0,2219	0,3190	0,3394	0,4086	0,3741
	RMSE	0,0347	0,0219	0,0283	0,0494	0,0227	0,0270
	x ²	0,0000	0,0003	0,0000	0,0005	0,0014	0,0027
Page	k	0,8459	1,4690	2,2820	1,8330	3,1360	3,1800
	n	0,8215	0,8766	0,7610	0,6001	0,6402	0,3804
	R ²	0,9982	0,9971	0,9994	0,9990	0,9991	0,9993
	E(%)	0,0346	0,1760	0,2123	0,1173	0,2680	0,1379
	RMSE	0,0128	0,0169	0,0074	0,0102	0,0087	0,0081
	x ²	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001
Henderson y Pabis	a	0,8785	0,9862	0,9849	0,6308	0,9956	0,9984
	k	0,6821	1,5560	2,7640	1,4010	4,7370	6,9250
	R ²	0,9962	0,9956	0,9919	0,9903	0,9934	0,9920
	E(%)	0,0660	0,2182	0,3332	0,2508	0,4097	0,3742
	RMSE	0,0444	0,0211	0,0246	0,1315	0,0226	0,0270
	x ²	0,0030	0,0005	0,0013	0,0265	0,0017	0,0028
Wang y Singh	a	-0,2321	-0,3557	-0,4725	-0,4420	-0,5215	-0,6735
	b	0,0228	0,0479	0,0737	0,0675	0,0847	0,1366
	R ²	0,8795	0,8586	0,6885	0,7287	0,4760	0,4577
	E(%)	0,1132	0,5876	2,3495	1,0665	3,3514	2,1009
	RMSE	0,1486	0,1508	0,1668	0,1572	0,2080	0,2244
	x ²	0,0530	0,0263	0,0014	0,0024	0,0025	0,0013
Midilli	a	0,9940	0,9968	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	k	0,8421	1,5200	2,3250	1,8930	3,2450	3,4640
	n	0,8347	0,9169	0,7761	0,6286	0,6666	0,4507
	b	0,0009	0,0034	0,0026	0,0032	0,0031	0,0047
	R ²	0,9979	0,9981	0,9999	0,9997	0,9998	0,9999
	E(%)	0,0319	0,0752	0,0736	0,0278	0,1051	0,0329
	RMSE	0,0126	0,0146	0,0035	0,0072	0,0042	0,0026
	x ²	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

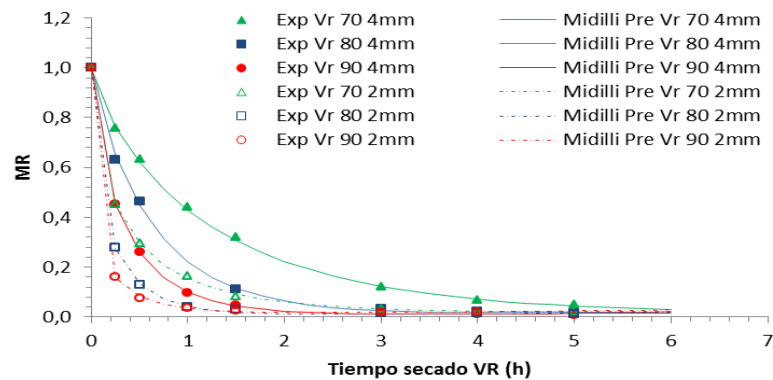


Figura 11. Ajuste del modelo de Midilli en cinéticas de secado de muestras de bananito por VR a 4 y 2 mm

Tabla 7. Modelación de cinéticas de secado de muestras de bananito por SC a 4 y 2 mm

Modelo	Constantes	Temperatura secado SC 4mm			Temperatura secado SC 2mm		
		70°C	70°C	80°C	90°C	80°C	90°C
Newton	k	0,1560	0,2090	0,3180	0,1090	0,4490	0,7910
	R ²	0,9702	0,9841	0,9704	0,9982	0,9970	0,9907
	E(%)	0,2970	0,3936	0,2513	1,8147	0,4569	0,2167
	RMSE	0,3817	0,3804	0,4374	0,6287	0,5407	0,5446
	x ²	0,7086	0,3804	0,5655	0,0001	0,5041	0,7842
Page	k	0,1470	0,5719	0,7411	0,2760	0,2090	0,4850
	n	0,9480	0,3680	0,1230	0,4550	0,6840	0,3640
	R ²	0,9971	0,9993	0,9997	0,9986	0,9979	0,9989
	E(%)	0,4942	0,8165	1,7324	1,8677	2,8726	1,6228
	RMSE	0,3821	0,4823	0,5864	0,6503	0,6435	0,6160
	x ²	0,4503	0,6178	0,3733	0,0293	0,0298	0,0731
Henderson y Pabis	a	0,9350	1,8488	1,8073	0,9964	0,9935	0,8170
	k	0,1415	0,3879	0,5555	0,1320	0,7250	0,5350
	R ²	0,9958	0,9972	0,9929	0,9981	0,9970	0,9913
	E(%)	0,3660	0,1625	0,2541	1,5456	0,3717	0,2737
	RMSE	0,4097	0,0682	0,1264	0,6083	0,5565	0,6221
	x ²	0,7651	0,0011	0,0353	0,0250	1,0473	0,8354
Wang y Singh	a	-0,0972	-0,0430	-0,0853	-0,2270	-0,2858	-0,3791
	b	0,0139	0,0085	0,0136	0,0195	0,0297	0,0534
	R ²	0,9677	0,9567	0,9378	0,8779	0,8350	0,8709
	E(%)	5,5067	2,9161	3,6214	0,6454	0,6558	0,4634
	RMSE	0,9676	0,7228	0,7389	0,7509	0,7141	0,7224
	x ²	0,5899	0,0103	0,0048	2,9259	1,9933	1,8603
Midilli	A	0,4320	0,9950	0,9986	0,0442	1,0030	1,0010
	k	0,8600	0,3652	0,3395	0,7040	1,3980	1,6100
	n	0,7630	0,8023	0,7278	0,5910	0,9433	0,8139
	B	0,1130	0,0001	0,0004	0,1440	0,0032	0,0040
	R ²	0,9970	0,9993	0,9997	0,9994	0,9993	0,9999
	E(%)	5,1352	0,2641	0,9576	3,3135	0,5204	0,3877
	RMSE	0,9922	0,4127	0,4628	1,1536	0,6096	0,6142
	x ²	0,2250	0,8001	0,2532	0,6364	1,6895	1,5593

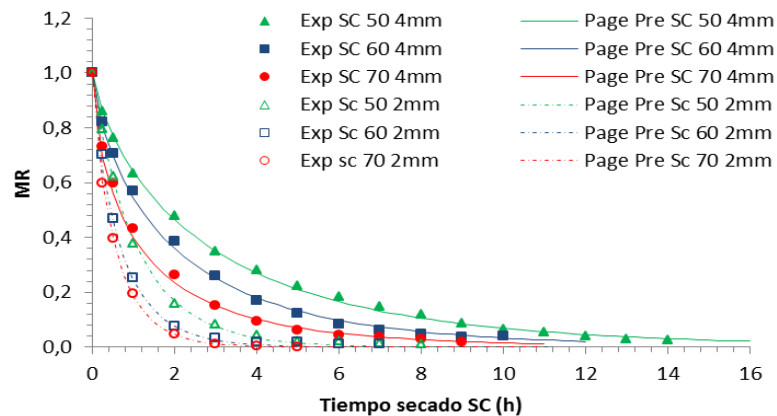


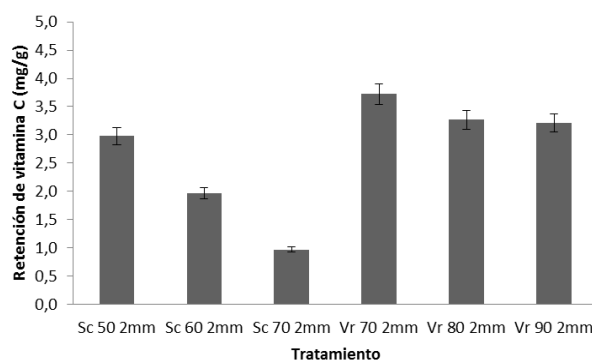
Figura 12. Ajuste del modelo de Page en cinéticas de secado de muestras de bananito por SC a 4 y 2 mm

Objetivo específico 2: Cuantificar los cambios del contenido de vitamina C y contenido aromático al final del proceso de secado de rodajas de bananito secados por ventana de refractancia™ y aire caliente.

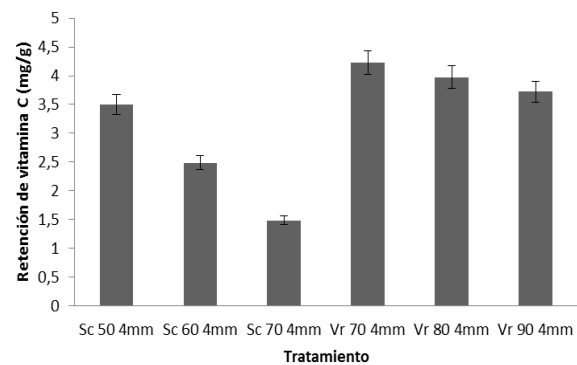
Retención de vitamina C

Se determinó la retención de vitamina C (mg/g) para rodajas secadas con SC y VR a 2 y 4 mm respectivamente en las figuras 12a y 12b. Esta determinación se realizó a un nivel de humedad (bs) de muestras que varió entre 0,09 a 0,11 g. agua/g. m.s. Los resultados muestran que los tratamientos secados con VR (2 y 4 mm) presentaron significativamente ($p < 0,05$) mayor retención de Vitamina C respecto a los procesados con el SC. Esta retención con VR es un indicativo que este método también conserva otros nutrientes en la fruta debido a que la vitamina C es un indicador de conservación de los otros nutrientes. Este resultado coincide con los reportados en otros alimentos por Abonyi et al., (2002) y Nindo et al., (2003).

También se observa que a menor temperatura mayor es la retención de vitamina C, similar resultado observaron Di Scala & Crapiste; (2008), Kaya et al., 2010, Ramallo & Mascheroni, (2012) y Djendoubi-Mrad et al., (2011). Con respecto al espesor se observa mayor retención de vitamina C con mayor espesor en ambos métodos de secado.



12a



12b

Figura 12. Retención de vitamina C de muestras de bananito secadas por VR y SC a 2 y 4 mm

Retención de aromas

Para el análisis del perfil aromático en los distintos tratamientos, se tomaron muestras de banano bocadillo con CH entre 0,09 y 0,11 g. agua/g. m.s. En la figura 13 se muestran los cromatogramas correspondientes a los tratamientos con VR a 4mm. Se observa en algunos picos una disminución gradual conforme se aumenta la temperatura de secado, debido principalmente a la volatilización de algunos compuestos por acción de la temperatura del proceso. De este grupo de tratamientos se destacan los compuestos acetaldehído, etanol, 2-pentanona, 2-pentanol y 3 metil-1butanol, que presentan descripciones de aroma a fresco, frutal, banano y dulce. En el proceso de VR 90 se detectó la presencia de furfural, característico de reacciones caramelización (Vermeir et al., 2009).

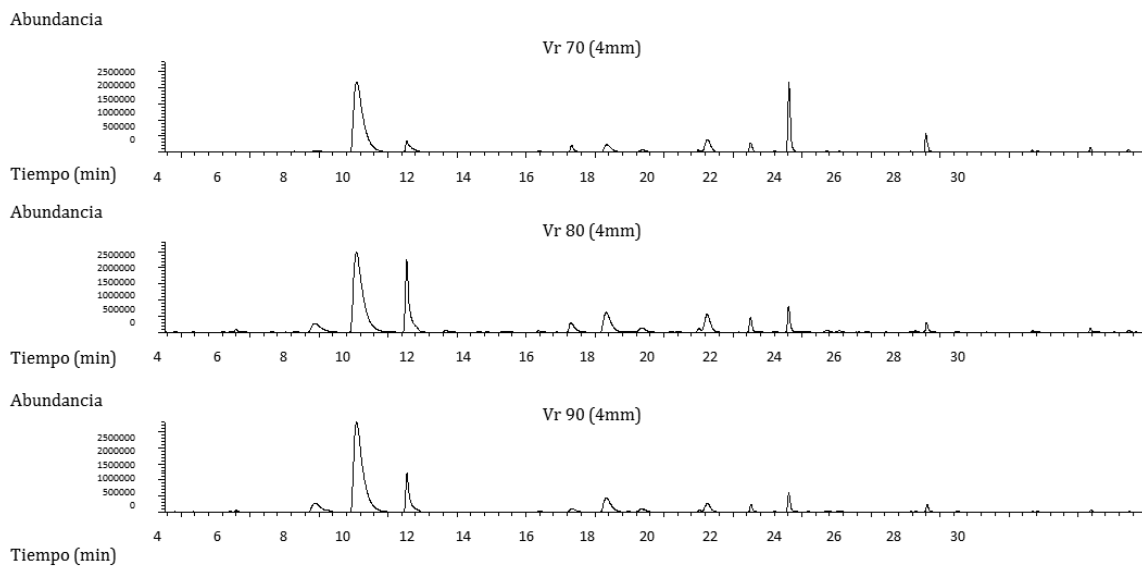


Figura 13. Retención de aromas de muestras de bananito secadas por VR a 4 mm

En la figura 14 se muestran los perfiles aromáticos de los tratamientos con VR a 2mm, donde se observa mayor disminución de las señales o picos cromatográficas, debido a que la superficie de transferencia de calor se incrementó al disminuir el espesor de la muestra y por tanto se aumenta la probabilidad de volatilización de los aromas en la muestra con respecto a los del espesor de 4mm (figura 13). En este grupo de tratamientos se conservan los mismos compuestos volátiles representativos del aroma a banano a pesar de la disminución de la altura de los picos. Los compuestos volátiles registrados por el detector indican que durante el secado se presentaron reacciones de caramelización. Se detectó un compuesto distintivo de aroma a miel y dulce en el tratamiento de Vr 90 correspondiente al 1-hexanol, indicador de que en este último tratamiento se pudo haber presentado una caramelización de la muestra aún mayor que a 70 y 80°C (Wang et al., 2007a).

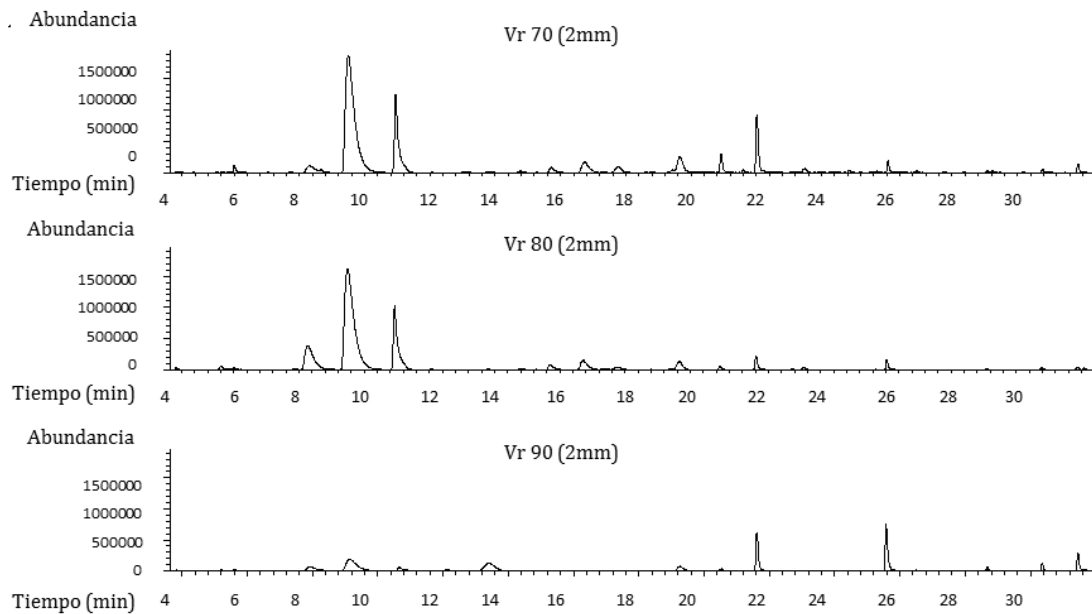


Figura 14. Retención de aromas de muestras de bananito secadas por VR a 2 mm

En la figura 15 se muestran los perfiles cromatográficos de los tratamientos con SC a 4mm. Se nota que las señales son visibles a 50°C a diferencia de los tratamientos a 60 y 70°C, también se nota que los volátiles característicos del aroma a banano, el 2-pentanona y el 2-pentanol sólo están presentes en el tratamiento a 50°C. Este resultado indica que los volátiles fueron arrastrados y volatilizados por el aire caliente a 60 y 70°C que actúa como medio calefactor, también el aumento en la temperatura geométrica del material vegetal hace que algunos sitios activos se degraden térmicamente ocasionando que las notas a fresco del aroma a banano se disminuyan o desaparezcan (Wang et al., 2007b)

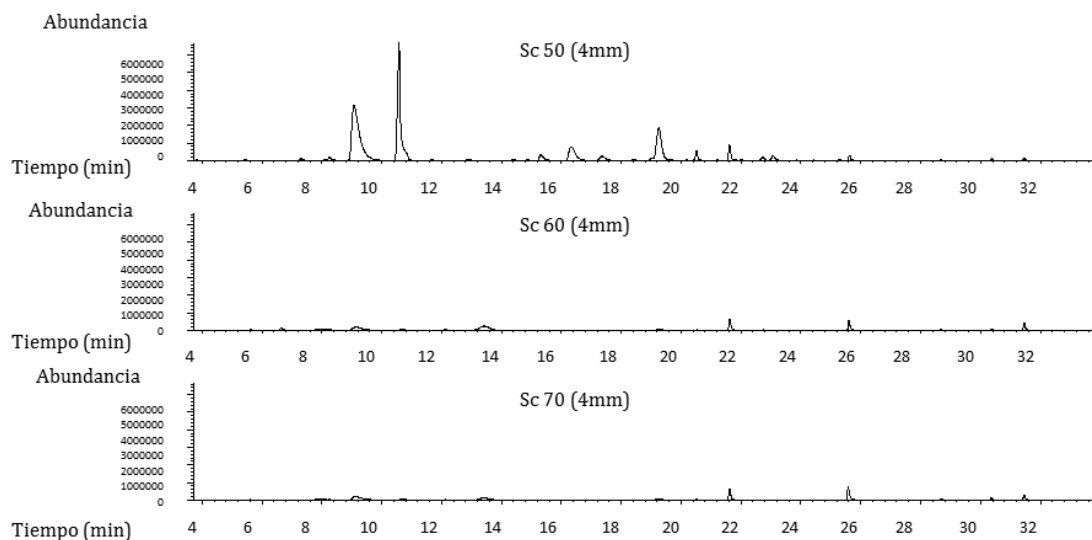


Figura 15. Retención de aromas de muestras de bananito secadas por SC a 4 mm

La figura 16 muestra el cromatograma obtenido de los tratamientos con SC a 2mm. Comportamiento similar a las señales mostradas en la figura 15. En los tratamientos a 60 y 70°C se evidencia nuevamente la pérdida de los volátiles característica a banano por efecto del incremento de temperatura (Vermeir et al., 2009).

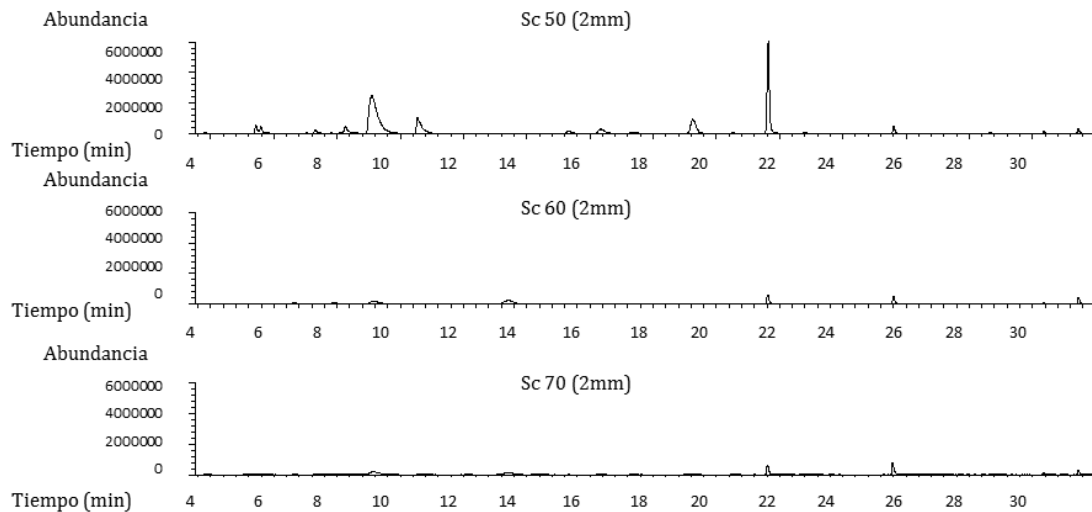


Figura 16. Retención de aromas de muestras de bananito secadas por SC a 2 mm.
Conclusiones

Conclusiones

Se evidenció que el método de secado por VR emplea menos tiempo para secar muestras de bananito comparado con el método de secado convectivo con aire caliente, independientemente del espesor (2 y 4 mm) y la temperatura (70, 80 y 90°C). Este resultado es favorable para efectos de calidad, ahorro energético y reducción del costo de proceso.

El método por ventana refractancia presentó significativamente menores pérdidas de calidad en muestras de bananito respecto al secado convectivo; presentó mayor retención del color (L^* y DE), de vitamina C, de concentración aromática y de agua en el proceso de rehidratación.

Con el incremento de la temperatura y menor espesor de muestra se logran mayores cinéticas de secado, pero se evidencia menor retención del color, de vitamina C y de concentración aromática., así como de menor capacidad de rehidratación.

Los métodos de secado VR y SC lograron disminuir la actividad de agua en muestras de banano bocadillo al final del secado con valores inferiores a 0.55, lo que indica que estos dos métodos de secado permiten obtener muestras estables y seguras microbiológicamente durante almacenamiento. Sin embargo, con VR, mayor temperatura y menor espesor se obtienen valores de a_w más rápidas.

El coeficiente de difusión efectivo de humedad en muestras de bananito fue influenciado por el espesor y por la



temperatura de proceso, mostrando mayores valores con muestras de mayor espesor y con el incremento de temperatura. Lo cual indica que la matriz celular del bananito con mayor espesor y con incremento de la temperatura de secado se provoca menor resistencia en la difusión del agua. Las muestras con mayor espesor requieren menor energía de activación para iniciar la difusión de agua de la matriz hacia el medio que lo rodea.

De acuerdo a los resultados de este trabajo el método de Ventana de refractancia es una alternativa de conservación de alto impacto en muestras de banano bocadillo por emplear tiempos cortos de secado, baja actividad de agua, mantener significativamente el color y presentar mayor retención de Vitamina C y de concentración aromática respecto al secado tradicional con aire caliente. Estos resultados pueden ser aplicados al secado de otros materiales vegetales.

Los modelos cinéticos Midilli y Page fueron los de mejor ajuste a las cinéticas de secado de muestras de banano bocadillo por VR y SC respectivamente, ya que presentaron los valores más altos del coeficiente de correlación (R^2) y los valores más bajos de RMSE y X . Esto significa que los modelos son adecuados para predecir las cinéticas de secado en banano bocadillo en cualquier tiempo de proceso por VR y SC en las condiciones estudiadas en este trabajo

- Recomendaciones

-En próximas propuestas, sería de vital importancia monitorear la cinética de compuestos aromáticos y de compuestos bioactivos como β -carotenos y luteína presentes en el bananito que son compuestos de impacto a nivel sensorial y nutricional.

Referencias

- Abonyi, B.I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C.G., Chew, B.P., Mattinson, D.S., Fellman, J.K., 2002. Quality retention in strawberry and carrots purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science* 67(3), 1051-1056.
- Akgun, N. A., & Doymaz, I. (2005). Modeling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68, 455–461.
- AOAC (1980). Official methods of analysis, 13th edition. Association of the Official Agricultural Chemists, Washington D.C
- Atarés, L., Gallagher, M.J.S. & Oliveira, F.A.R.(2011). Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. *Journal of Food Engineering*, 103, 401–408
- Augura, Asociación de bananeros de Colombia. (2013). Información gremial. Recuperado de: http://www.augura.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=63&Itemid=16
- Azoubel, P.M., & Murr, F.E.X. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61, 291-295.
- Baini, R. and Langrish, T. A. G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 330–343.
- Boudhrioua, N., Michon, C., Cuvelier, G. and Bonazzi, C. (2002). Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. *Journal of Food Engineering*, 55, 115–121
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R. and Fellman, J.K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111, 135–148
- Corzo, O., Bracho, N., Alvarez, C., 2008. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity



- stages during air drying. *Journal of Food Engineering* 87(4), 479-484.
- Di Scala, K., Crapiste, G., 2008. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. *LWT- Food Science and Technology* 41(5), 789-795.
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., Kouliadiati, J., 2008. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv.'Amelie') with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88(4), 429-437.
- Djendoubi-Mrad, N., Nourhène, B., Nabil, K., Francis, C., Catherine, B., 2011. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. *Food and Bioproducts Processing* available on line, 1-9.
- Doymaz, I., Ismail, O., 2011. Drying Characteristics of sweet cherry. *Food Bioproducts Processing* 89(1), 31-38.
- Da Silva, C.M.D.P.S., Silva, W.P., Farias, V.S.O., Gomes, J.P., 2012.. Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas. *Engenharia Agrícola* 32 (2), 342–353.
- Edoun, M., A. Kuitche and G. Francois. 2014. Effect of Thermal Process and Drying Principle on Color Loss of Pineapple Slices. *American Journal of Food Science and Technology* 2(1), 17-20.
- Fernando, W.J.N., Ahmad, A.L., Shukor, S.R.Abd., Lok, Y.H., 2008. A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering* 88(2), 229-238.
- Heredia, A., Barrera, C. & Andrés, A. (2007). Drying of cherry tomato by combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering*, 80, 111-118
- Jiménez, M.F., Cárdenas, J.D., Ayala-Aponte, A. and Restrepo, J. (2014). Alternative drying of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) through refractance windowtm and convective air. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 67(2), 40-42.
- Joardder, M.U.H., Kumar, C., Brown, R.J. and Karim, M.A. (2015). A micro-level investigation of the solid displacement method for porosity determination of dried food. *Journal of Food Engineering*, 166, 156–164
- Kaya, A., Aydin, O., Kolayli, S., 2010. Effect of drying conditions on the Vitamin C (ascorbic acid) content of Hayward kiwifruits (*Actinidia deliciosa* Planch). *Food and Bioproducts Processing* 88(2-3), 165-173.
- Ketelaars, A. A. J., Jomaa, W., Puigalli, J. R. and Coumans, W. J. (1992). Drying shrinkage and stress. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying 92, Part A* (pp. 293-303). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology* 15 (10), 1145–1155
- Krokida, M.K., Philippopoulos, C., 2005. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology* 23(4), 799-830.
- Kurozawa, L.E., Hubinger, M.D., Park, K.J., 2012. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering* 108(1), 43-50.
- Lagunez-Rivera, L., Ruiz-López, I.I., García-Alvarado, M.A., 2007. Mathematical simulation of the effective diffusivity of water during drying of papaya. *Drying Technology* 25 (10), 1633-1638.
- Lewis, M.J.(1993). *Physical properties of foods and food processing system*. Ellis Horwood Ltd. Chichester, England, pp. 41-42.
- Lewicki, P.P. and Jakubczyk, E. (2004). Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering* 64, 307–314.
- Liu, G., Chen, J., Liu, M. and Wan, X. (2012). Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of bio-porous material. *Procedia Engineering*, 31, 634 – 640
- Lombard, G.E., Oliveira, J.C., Fito, P. & Andrés, A. (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, 85, 277–284.
- Marques, L.G., Ferreira, M.C., Freire, J.T. (2007). Freeze-drying of acerola (*Malpighiaglabra* L.). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 46(5), 451-457.
- Marques, L.G., Prado, M.M., Freire, J.T., 2009. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *Food*



- Science and technology 42(7), 1232-1237.
- Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61(3), 373-386.
- Mundada, M., Hathan, B.S. & Maske, S. (2010). Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering*, 107, 307-316
- Nindo, C.I., Wang, S.W., Tang, J., Powers, J.R., 2003. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L). *LWT-Food Science and Technology* 36(5), 507-516.
- Núñez-Mancilla, Y., et al., (2012). Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*), *LWT - Food Science and Technology*, doi:10.1016/j.lwt.2012.02.027
- Ochoa-Martínez, C.I., Quintero, P.T., Ayala, A.A., Ortiz, M.J., 2012. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering* 109(1), 69-75.
- Ocoró-Zamora, M.U and A.A. Ayala-Aponte. 2012. Evaluación de la técnica de ventana de refractancia en el secado de puré de papaya (*Carica papaya* L.). *Vitae* 19, 72-73.
- Ortiz, M.J. and Ochoa-Martínez, C.I. (2014). Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Drying using Refractance Window method. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 67(2), 394-396.
- Pan, Z., Shih, C., McHugh, T.H. and Hirschberg, E. (2008). Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 1944-1951
- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N. and Soponronnarit, S. (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*, 85, 509-517.
- Ramallo, L.A., Mascheroni, R.H., 2012. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing* 90(2), 275-283.
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. (1997). Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 34, 429-440.
- Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D., 2012. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering*. 108(1), 103-110.
- Sacilik, K. and Elicin, A.K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *J. Food Eng.* 73 (3), 281-289.
- Sagar, V. R. and Kumar, S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 15-26.
- Seremet, L., et al. (2015). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.125>
- Sturman, B., A. Nunez y W. Hofacker. 2014. Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering* 62(2), 455-460
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., Soponronnarit, S., 2011. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *Food Science and Technology* 44(6), 1502-1510.
- Toğrul, H., 2005. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 71(3), 311-323.
- Toğrul, I.T., Pehlivan, D., 2003. Modelling of drying kinetics of single apricots. *Journal of Food Engineering* 58(1), 23-32.
- Vega-Gálvez, A., Ayala-Aponte, A., Notte, E., de la Fuente, L., Lemus-Moncada, R., 2008. Mathematical modeling of mass transfer during convective dehydration of brown algae *Macrocystis Pyrifera*. *Drying Technology*. 26(12), 1610-1616.
- Vermeir, S., Hertog, M.L.A.T.M., Vankerschaver, K., Swennen, R., Nicolai, B.M. & Lammertyn, J. (2009). Instrumental



based flavour characterisation of banana fruit. LWT - Food Science and Technology, 42, 1647–1653

- Wall, M.M. (2006). Ascorbic acid, vitamin A, and mineral composition of banana (*Musa sp.*) and papaya (*Carica papaya*) cultivars grown in Hawaii. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 434–445
- Wang, J., Li, Y.Z., Chen, R.R., Bao, J.Y. & Yang, G.M. (2007a). Comparison of volatiles of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze-drying and air-drying. *Food Chemistry*, 104, 1516-1521
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. & Hu, X. (2007b). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40, 39–46.
- Witrowa-Rajchert, D. and Lewicki, P. (2006). Rehydration properties of dried plant tissues. *Int. J. Food Sci. Technol.* 41, 1040–1046.
- Xiao, H-W., Bai, J-W., Xie, L., Sun, D-W. and Gao, Z-J. (2015). Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panaxquinquefolium L.*) slices with quality attributes considered. *Food and bioproducts processing*, 94, 581–591

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2