

EFECTO DE LA LIOFILIZACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AJÍ ROCOTO (*Capsicum pubescens* R&P) CON O SIN SEMILLA

Birina L. Caballero¹, Carlos J. Márquez² y María I. Betancur³

RESUMEN

Con la finalidad de fomentar la transformación agroindustrial en *Capsicum pubescens*, en esta investigación se deshidrató ají rocoto con y sin semillas, cultivado en la zona rural de San Cristóbal, Medellín, Antioquia (Colombia), mediante liofilización y se evaluó su efecto sobre las características del producto final. Se empleó un arreglo de parcelas divididas, con el factor de la programación de la velocidad de calentamiento, aplicando una tasa de aumento de temperatura entre 0,02 y 0,05 °C·min⁻¹ durante la sublimación en la parcela principal, y el factor semilla en la subparcela, con una aleatorización completamente al azar y tres repeticiones. Se evaluaron las características físico-químicas del producto final de contenido de humedad, actividad de agua (a_w), pH, acidez, indicadores de color en el sistema CIE-L*a*b* y capacidad de rehidratación, así como posible afectación del tejido usando microscopía electrónica de barrido. El porcentaje de humedad, a_w , pH y acidez no se afectaron significativamente entre los tratamientos liofilizados ($P>0,05$) logrando obtener valores máximos de 8,62% de humedad y a_w de 0,33. Se mejoró la luminosidad (L^*) y cromaticidad (C^*) del ají rocoto liofilizado con y sin semilla con respecto al producto en fresco; además, se aumentaron los atributos de color b^* y h° . Con la velocidad de menor calentamiento para la liofilización, los tratamientos con y sin semillas presentaron una mayor capacidad de rehidratación. En los frutos sin semilla se necesitó menor tiempo para alcanzar tanto las temperaturas de congelación como de sublimación, a la vez que mejoraron la mayoría de los indicadores de color.

Palabras clave adicionales: Capacidad de rehidratación, conservación, deshidratación

ABSTRACT

Effect of the freeze-drying on the physico-chemical characteristics of rocoto chili pepper (*Capsicum pubescens* R&P)

In order to foment the agroindustrial transformation of *Capsicum pubescens*, in this research we dehydrated rocoto chili peppers with and without seeds, harvested in the rural zone of San Cristobal Medellin, Antioquia (Colombia), through freeze-drying, and the properties in the final product were evaluated. Three times of the heating rate were programmed (temperature rise from 0.02 to 0.05 °C per minute during sublimation) using fruits with and without seeds. A split plot design was used with the programming in the main plot, and the presence of seeds in the subplot in a randomized block design with three replications. It was evaluated the physico-chemical properties of milled final product characteristics, moisture content (%), water activity (a_w), pH, acidity, color indicators CIE-L, and rehydration capacity (RC), as well as possible changes of the plant tissue using scanning electron microscopy. The moisture percentage, a_w , pH and acidity, did not differ among treatments ($P\leq 0.05$), reaching maximum moisture of 8.62 % and a_w of 0.33. The luminosity (L^*) and chroma (C^*) of the dried fruit with respect to fresh fruit was improved. Attributes of color b^* and h° increased as well. With the lower heating rate for freeze drying, the fruit with and without seeds presented higher RC. The seedless fruits required less time to reach both freezing and sublimation temperatures and showed higher values of most color indicators.

Additional key words: Conservation, drying, rehydration capacity

INTRODUCCIÓN

El ají rocoto (*Capsicum pubescens*) es originario de los Andes y sus principales cultivos

en América del Sur se encuentran en Perú y Bolivia (Meckelmann et al., 2015); sin embargo, existen cultivos en lugares aislados de Colombia, en el departamento de Antioquia con condiciones

Recibido: Septiembre 12, 2016

Aceptado: Agosto 25, 2017

¹ Área curricular de Agroingeniería y Alimentos, Posgrado. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. e-mail: blcaballerog@unal.edu.co

² Dpto. de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. e-mail: cjmarque@unal.edu.co (autor de correspondencia)

³ Dpto. de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. e-mail: mibetanc@unal.edu.co

climáticas adecuadas para esta especie (Yamamoto et al., 2013).

La vida útil de varias especies del género *Capsicum* sp. se ve afectada debido a que el fruto es altamente perecedero por su alto contenido de humedad, el cual se encuentra entre 85 a 89% (Yun-Hon, 2015; García et al., 2009), donde el contenido de humedad disponible permite el desarrollo de microorganismos que deterioran de manera ágil el producto (Gill y Ruiz, 2010). La liofilización se constituye en una alternativa interesante para conservar y transformar el ají, permitiendo prolongar el tiempo de vida útil, conservando las propiedades físico-químicas del alimento relacionadas con la calidad y disminuyendo la actividad del agua (Abdelwahed et al., 2006; Amores, 2011), el producto deshidratado, presenta ventajas con respecto al fresco, debido a que se reduce el espacio de almacenamiento, facilita su envasado y transporte, pero principalmente aumenta su vida útil (González et al., 2008).

El proceso de liofilización comienza con la congelación del producto a bajas temperaturas (-30°C a -40°C) donde el tamaño de los cristales de hielo se regula normalmente con las velocidades de congelación, puesto que una tasa lenta promueve la formación de cristales de gran tamaño, favoreciendo la liofilización, pero afectando la integridad de las membranas celulares, mientras una alta tasa produce microcristales minimizando el daño a las membranas celulares; sin embargo, simultáneamente incrementa la presencia de agua no congelada atrapada en la zona vítrea que es difícil de retirar en el secado (Orrego, 2008). La segunda etapa es el secado primario, en el cual se produce un calentamiento bajo condiciones de vacío, para retirar el agua por sublimación en distintas etapas (Ayala et al., 2010). Esta velocidad de secado puede influir en las características físico-químicas del producto final (Orrego, 2008).

A través de la liofilización se han obtenido productos deshidratados en frutas y hortalizas con atributos, como el sabor, color, textura y aroma que se resaltan mejor con respecto al secado por convención forzada (Orrego, 2008), además de poseer estructura porosa que facilita la rápida rehidratación al adicionar agua. Debido a la rapidez y facilidad de reconstitución de un producto liofilizado la técnica marca su

superioridad sobre otros métodos de secado (Duan et al., 2010).

El color en el ají deshidratado es una característica importante en la calidad comercial (Martínez y Ordóñez, 2015), los frutos liofilizados tienen mejor coloración roja y amarilla, y conservan mejor el tono característico de la pulpa fresca (Vargas, 2015), al compararlos con frutos deshidratados mediante métodos tradicionales (Shishegarha et al., 2002; Ceballos, 2012).

La tecnología de liofilización se aplica en el desarrollo de investigaciones tanto en alimentos como en otras matrices, con la finalidad de aumentar su impacto en la rentabilidad (Ramírez, 2006), puesto que las operaciones de transferencia de calor en la deshidratación forzada puede alterar las propiedades físico-químicas y nutricionales, sobre todo presentando cambios significativos en el color debido a la inestabilidad de los pigmentos que se afectan por el proceso de oxidación catalizado por el calor (Villota y Hawkes, 2006).

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia a través del programa para la transformación productiva del sector hortofrutícola, fomenta la transformación agroindustrial del género *Capsicum* sp. debido al gran potencial de exportación del ají picante deshidratado (Bancoldex, 2014; DNP, 2015). El objetivo de la presente investigación fue deshidratar ají rocoto con y sin semillas mediante procesos de liofilización variando las condiciones de velocidad de sublimación y evaluar las características físico-químicas del producto final

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la investigación se utilizaron frutos maduros de ají rocoto cultivado en la zona rural de San Cristóbal, Medellín, Antioquia (Colombia), localizado entre 1.800 y 2.200 msnm con temperaturas de 8 a 21°C, HR promedio de 79 % y precipitación anual de 1.668 mm. Los frutos fueron colectados en similar grado de madurez correspondiente a la del consumo y fueron almacenados a 5 °C por cinco días en el Laboratorio de Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Un total de 30 kg de frutos se lavaron y desinfectaron con hipoclorito de sodio (0,1 mL·L⁻¹) durante 5 minutos y se secaron con toalla absorbente. A los frutos se le retiraron los

pedúnculos y fueron troceados manualmente en tamaños de 10 ± 2 mm de longitud, 10 ± 2 mm de ancho y 5 ± 1 mm de espesor incluyendo la epidermis, con un peso total de 425 g por unidad experimental.

Para la liofilización, los trozos se dispusieron en bandejas de acero inoxidable y a cada una de ellas se les registró la temperatura mediante un termopar tipo K (Omega Thermocouple, mod. P3400) introducido en el centro geométrico de un trozo de fruto ubicado en el centro de las bandejas.

Se empleó un equipo de liofilización Labconco mod. 7948040 de 12 litros de capacidad, con tres bandejas y una bomba rotatoria de vacío con flujo de $195 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ y presión absoluta de 0,14 mbar. Inicialmente, el material vegetal fue enfriado

desde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $-40\text{ }^\circ\text{C}$, a una velocidad de $0,10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ por un total de 10,83 h.

Para determinar el efecto de la liofilización sobre las propiedades fisicoquímicas del ají rocoto se estudió el factor velocidad de calentamiento durante el proceso de sublimación correspondiente a uno, tres y cinco segmentos de calentamiento (tres programaciones), aplicando una tasa de aumento de temperatura entre $0,02$ y $0,05 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, un tiempo de sostenimiento de 1,2 h entre cada uno de los segmentos y una temperatura final de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ por 3 h. En la Figura 1 se muestra la programación teórica del perfil de congelamiento y de calentamiento de la unidad evaporadora con los diferentes segmentos aplicados.

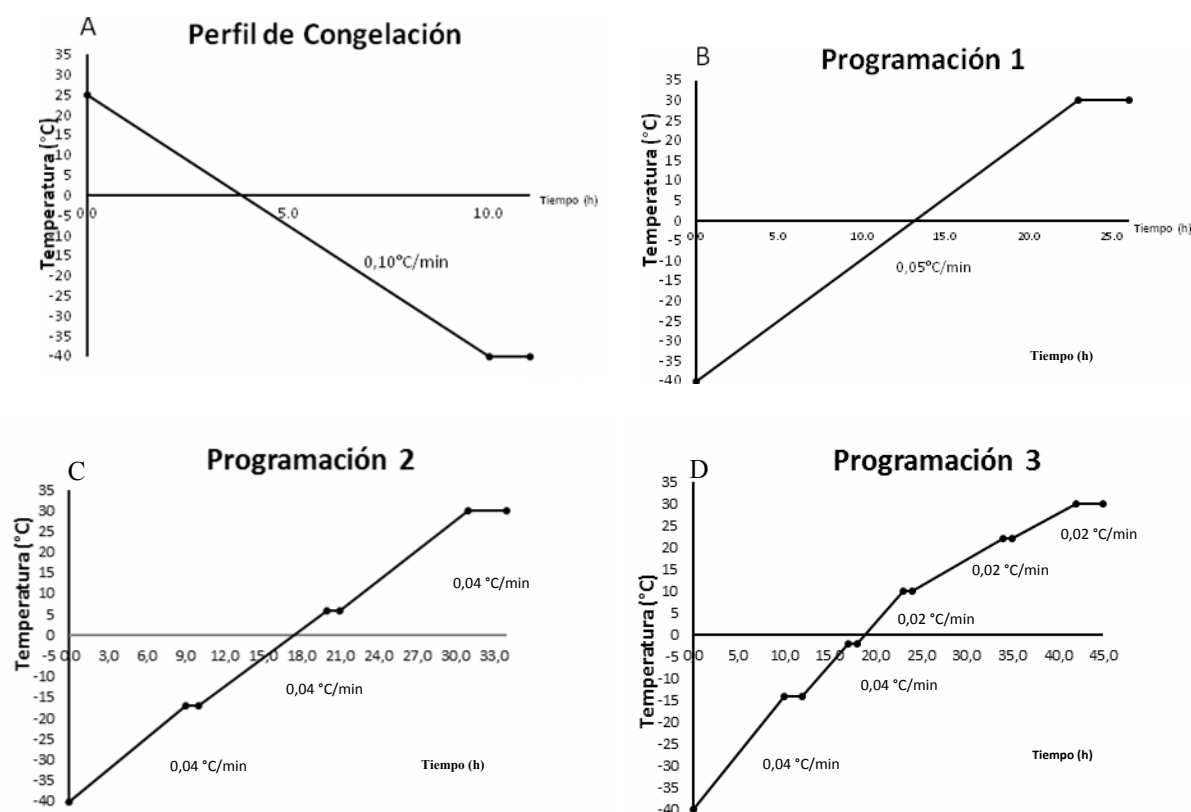


Figura 1. Perfil teórico de congelación (A) y programaciones para el calentamiento durante el proceso de liofilización del ají rocoto. (B) Un segmento por 26,3 horas. (C) Tres segmentos por 34,6 horas. (D) Cinco segmentos por 45,3 horas.

El otro factor de estudio fue el efecto de la semilla en los frutos (presencia y ausencia de semillas).

Se estructuró un arreglo de parcelas divididas, con el factor de la programación de la velocidad

asignado a la parcela principal (tres niveles) y el factor categórico de semilla en la subparcela (dos niveles), con una aleatorización completamente al azar y cuatro repeticiones para un total de 24 unidades experimentales. Antes del proceso de

líoilizado se efectuó la caracterización del producto en fresco (entero sin pedúnculo) determinando las propiedades fisicoquímicas de color, humedad, actividad de agua, pH, sólidos solubles totales (SST), porcentaje de acidez, índice de madurez y firmeza en un total de 25 frutos.

Después que las muestras se líoilizaron, fueron sometidas a molienda en un equipo Fritsch Germany, con un tamaño de malla de 1 mm, a 8000 rpm, durante 5 min, obteniendo un tamaño de partícula aproximado de 50 μm , las muestras luego fueron almacenadas en bolsas plásticas debidamente rotuladas y guardadas en frascos de vidrio ámbar sellados herméticamente a 25 °C para su posterior uso.

Para determinar el contenido de humedad de las muestras de ají fresco se empleó el método gravimétrico mediante secado a 105 °C hasta peso constante en una estufa Merrmet, de convección, en muestras de 2 g por fruto (AOAC, 2005). Para las muestras líoilizadas se determinó por medio de un analizador de humedad de lámparas infrarrojas (Sartorius, MA150), la actividad de agua se midió con un higrómetro de punto de rocío a 25 °C (Aqua LAB Decagon serie 3TE) método AOAC 978.12. La valoración de los sólidos solubles totales, se realizó por el método refractométrico (AOAC 932.12), utilizando un equipo Leica auto ABBE. El pH se evaluó por el método AOAC 981.12 empleando un potenciómetro Schott mod. CG-840B, evaluado sobre una muestra de jugo de ají representativa de 20 mL obtenida mediante macerado y filtrado en un tamiz de 0,1 mm de tamaño de poro. La acidez se determinó por el método de titulación potenciométrica (AOAC 942.15), mediante una solución estandarizada de NaOH a 0,1 N y se expresaron los resultados en porcentaje de ácido cítrico en base seca (AOAC, 2005), aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Acidez (b.s)} = \left(\frac{V_{\text{NaOH (mL)}} * N_{\text{NaOH (meq/mL)}} * \left(\frac{0,064 \text{ g}}{\text{meq}} \right)}{W_{\text{Peso de la muestra seca (g)}}} \right) * 100$$

El índice de madurez (IM), se calculó como la relación entre los SST (° Brix) y la acidez en base húmeda (%). Para la medida de la firmeza del producto en fresco, se aplicaron pruebas de compresión unidireccional usando un analizador de textura TA-XT2i mod. P/2, con punta de 5 mm de diámetro, a una velocidad de penetración de 1

$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ y profundidad de deformación de 15 mm, aplicado en la región ecuatorial del fruto (San Martín et al., 2012). Las determinaciones se realizaron en condiciones de laboratorio de 23 °C y 65 % HR.

Para la medida del color se utilizó un espectrofotómetro de esfera X-Rite, modelo SP-60, se obtuvieron las coordenadas de color del CIE- $L^*a^*b^*$, donde L^* es un indicador de la luminosidad, a^* y b^* son coordenadas de color, C especifica el croma y la h° denota el ángulo en una medición polar. A partir de las mediciones de color se calculó el cambio de color total (ΔE) (Maskan, 2001; Mohammad et al., 2008). Se realizaron tres mediciones para el producto en fresco y para cada tratamiento de los productos líoilizados.

La capacidad de rehidratación se determinó según metodología modificada (Arriola et al., 2006) mediante la cual se tomaron 0,5 g de muestra líoilizada que se colocó dentro de un filtro de polietileno con tamaño de poro 45 micras (previamente pesado), el cual se introdujo en un recipiente con 50 mL de agua destilada, sin agitación durante 5 min a 25 °C. Luego, el agua fue drenada y al filtro se le secó el exceso de humedad con una toalla absorbente, sin abrirlo, para posteriormente pesarlo. El agua ganada se calculó por diferencia de peso. Para la cinética de rehidratación se repitió la evaluación para los tiempos 10, 20 y 30 min. La capacidad de rehidratación se calculó con la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{G_{\text{de agua ganada}}}{G_{\text{de agua removida}}}$$

que representa la fracción de hidratación con relación a la humedad inicial del fruto (un valor de 1 indicaría rehidratación total).

Se utilizó microscopía electrónica como técnica para la valoración de la posible afectación estructural del tejido vegetal. Las muestras líoilizadas sin pulverizar, cortadas en cubos de 2 mm, aproximadamente, fueron observadas mediante un microscopio electrónico de barrido JSM-7100F FE-SEM, en una escala de 300 a 400X hasta encontrar la mejor resolución de imagen.

Se aplicó un diseño experimental de parcela divididas distribuidas completamente al azar con tres repeticiones para la parcela principal y cuatro para las subparcelas. Se realizó un

análisis de varianza, con el fin de determinar si existían diferencias entre los tratamientos. Para el caso de encontrar diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación de medias de diferencia mínima significativa (DMS). Para todo el procedimiento estadístico se empleó el programa de análisis R (R Development Core Team. Auckland University, New Zealand).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los valores de la caracterización de las propiedades físico-químicas del ají rocoto en fresco en donde se evidencia un alto contenido de humedad (90,69 %) y alta actividad de agua (0,97), identificándose como un producto perecedero, con probable favorecimiento para la proliferación de microorganismos.

De forma similar, Palta y Guevara (2002) y García et al. (2009) reportaron una humedad promedio para esta variedad de 92,6 % y 89,5 %, respectivamente aunque pudiera existir alguna variación atribuible a la posible interacción del genotipo con el ambiente (Echandi, 2005). Las coordenadas del color CIEL*a*b* indican un desplazamiento hacia el color rojo, característica muy demarcada por el estado de madurez del fruto (Meckelmann et al., 2015). Se obtuvo un peso promedio del fruto fresco de 43,07±7,68 g, con un rendimiento en pulpa sin semilla de 80,85 %.

Cuadro 1. Caracterización de las propiedades físico-químicas del ají rocoto

Propiedades Físico-químicas	Promedio ± SD
Humedad (%)	90,69 ± 0,006
a _w	0,97 ± 0,002
pH	4,35 ± 0,43
Acidez en base seca (%)	5,66 ± 0,93
SST (°Brix)	5,64 ± 0,75
Índice de madurez	11,12 ± 2,98
Firmeza-5 mm (N)	22,70 ± 4,35
L*	35,29 ± 2,13
a*	26,06 ± 2,53
b*	15,08 ± 2,71
C*	30,17 ± 3,18
h°	29,93 ± 3,65
n=25	

En la Figura 2A se pueden apreciar los perfiles

de temperatura del ají rocoto con y sin semilla usando una velocidad de congelación 0,10 °C/min y en la Figura 2 (B, C, D) se muestran los perfiles de las temperaturas de la unidad evaporadora y de la muestras de los tratamientos hasta llegar a 30 °C como temperatura final y 3 horas de sostenimiento. Durante la etapa de sublimación, el hielo se evapora desde la superficie y a medida que transcurre el proceso el nivel de sublimación presenta un perfil de avance dentro de la partícula de alimento, de manera que el vapor atraviesa capas ya secas para salir del producto (Orrego, 2008). Cuando existe una estructura más compacta dentro de la matriz alimentaria como las semillas del ají, este proceso se ralentiza, lo cual se evidencia en el comportamiento mostrado en la Figura 2, donde para los tratamientos con semilla se necesitó un mayor tiempo para alcanzar tanto las temperaturas de congelación como de sublimación.

En el Cuadro 2 se relacionan las propiedades físico-químicas evaluadas de los tratamientos del ají rocoto liofilizado y molido. De acuerdo al análisis de varianza no se evidenció diferencia significativa ($P>0,05$) entre el efecto de velocidad de calentamiento y la presencia y/o ausencia de semilla en los tratamientos liofilizados para el contenido de humedad, a_w, pH y acidez del fruto. Con la liofilización se logró obtener valores máximos en el contenido de humedad de 8,62 % y a_w de 0,33. Se han reportado valores de humedad en productos deshidratados del género *Capsicum* sp. entre 4,65 a 11 % y a_w entre 0,33 a 0,68 (González et al., 2008; Topuz et al., 2011; Toontom et al., 2012).

La estabilidad de un producto deshidratado se encuentra entre 0,2-0,4 de a_w, lo cual limita el crecimiento de micro-organismos, y las reacciones oxidativas, hidrolíticas y enzimáticas (Martínez et al., 1998; Ayala et al., 2010). Por su parte, una baja a_w en los productos liofilizados le confiere altas fuerzas de adsorción que experimentan cambios en el estado amorfo vítreo con la consecuente pérdida de muchos de sus atributos de calidad, por lo que se recomienda para este tipo de producto un almacenamiento en temperaturas de 10 a 30 °C y humedades inferiores al 60 % (Martínez et al., 1998). El análisis de varianza mostró diferencias para los indicadores del color según la presencia o ausencia de semilla, lo cual se atribuye al color natural oscuro de la semilla (Cuadro 3).

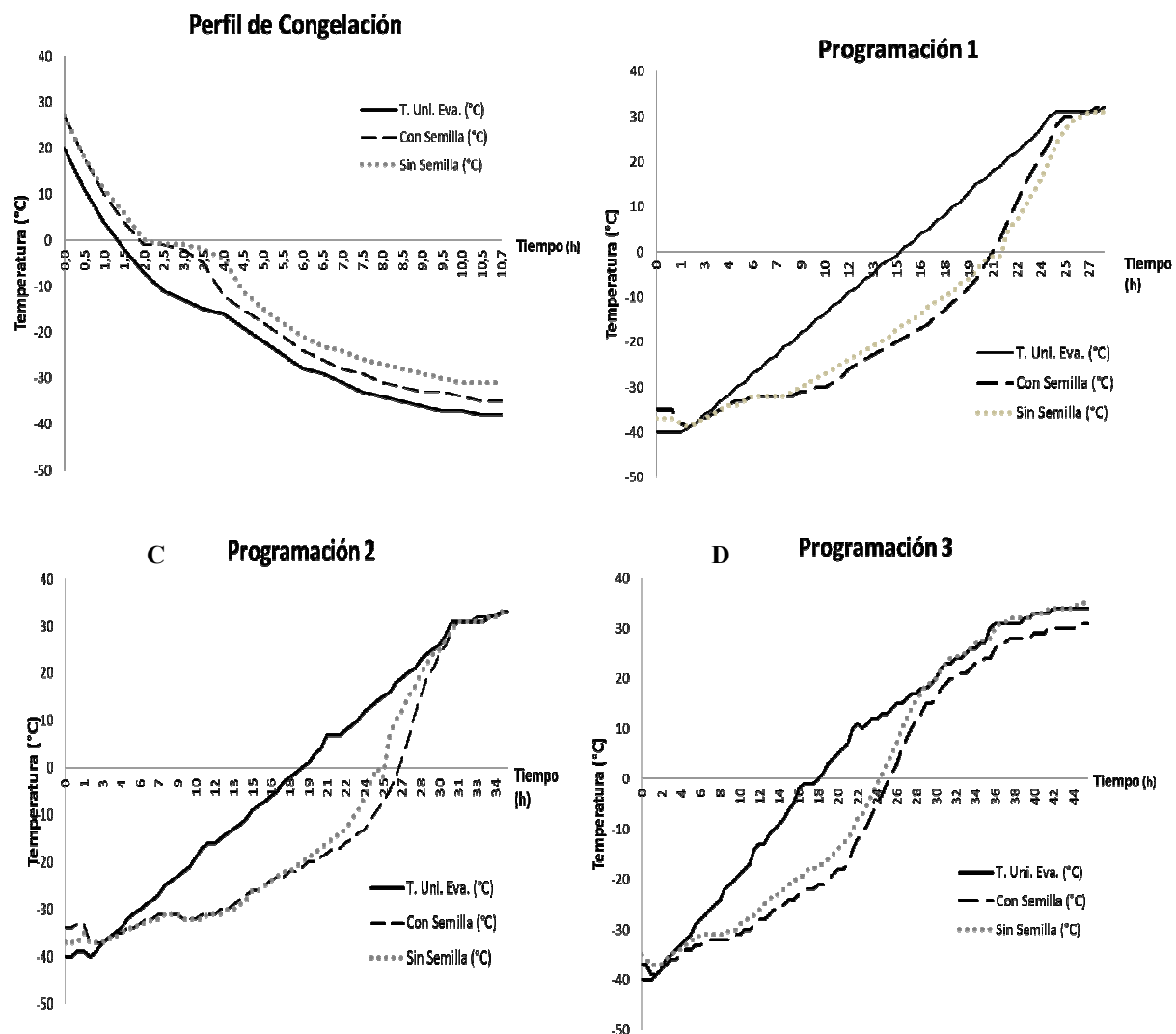


Figura 2. Perfil de congelación (A) y calentamiento de las muestras de ají rocoto con y sin semilla durante la liofilización (B, C y D)

Cuadro 2. Propiedades físico-químicas del ají rocoto liofilizado y molido

Tratamiento	Humedad (%)	a_w	pH	Acidez base seca (%)
P ₁ -Con	8,62 a	0,30 a	5,01 a	4,44 a
P ₁ -Sin	8,06 a	0,33 a	5,03 a	4,95 a
P ₂ -Con	7,14 a	0,28 a	5,13 a	4,80 a
P ₂ -Sin	7,44 a	0,29 a	5,11 a	4,50 a
P ₃ -Con	7,91 a	0,30 a	5,09 a	4,54 a
P ₃ -Sin	7,78 a	0,30 a	4,95 a	4,99 a

P1, P2 y P3 son las programaciones respectivas; Con: fruto con semilla; Sin: fruto sin semilla. En cada variable, letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba DMS ($P > 0,05$)

En el Cuadro 3 se observa, además, que los frutos sin semilla superaron a los sin semilla en las tres programaciones de velocidad para las

coordenadas de color a^* y b^* , así como en el croma (C) y cambio de color total (ΔE), este último sólo en las programaciones 2 y 3. El ángulo en medición

Caballero et al. Liofilización y características del ají rocoto con o sin semilla

polar (h°), por el contrario, fue siempre superior en los frutos con semilla. Solamente la luminosidad L^* mostró similitud en ambos tipos de fruto en

todas las programaciones. También se observa que los indicadores del color fueron poco afectados por las distintas programaciones.

Cuadro 3. Indicadores de color evaluados en el ají rocoto liofilizado y molido (promedios \pm SD)

Variable	Presencia de semilla	Programación		
		P ₁	P ₂	P ₃
L*	Con	59,49 a	60,04 a	60,98 a
	Sin	58,85 a	62,57 a	61,76 a
a*	Con	23,38 b	23,43 b	22,51 b
	Sin	27,76 a	27,71 a	25,80 a
b*	Con	24,97 b	24,95 b	25,81 b
	Sin	25,98 a	28,04 a	27,40 a
C*	Con	34,27 b	34,27 b	34,27 b
	Sin	38,10 a	38,10 a	37,66 a
h°	Con	46,97 a	46,81 a	48,97 a
	Sin	43,31 b	45,35 b	46,80 b
ΔE	Con	26,37 a	26,83 b	28,12 b
	Sin	26,24 a	30,26 a	29,28 a

En cada variable y programación, letras distintas indican que diferencias significativas entre frutos con o sin semilla según la prueba DMS ($P \leq 0,05$)

Al comparar los valores promedio de los frutos liofilizados con los valores de los frutos frescos se observa que no hubo cambios importantes en la coordenada de color a^* y se conservó el color rojo característico del fruto. Sin embargo, en la comparación con el producto en fresco los tratamientos liofilizados mostraron mayor L^* , b^* , C y h° . Por lo tanto se pudo establecer que el método de liofilización mejoró la luminosidad y cromaticidad del ají rocoto con respecto al producto en fresco, a diferencia de lo encontrado en procesos de deshidratación por convección forzada, donde se han mostrado alteraciones en los pigmentos carotenoides presentes en el ají, con el consecuente deterioro del color (González et al., 2008), mientras que el proceso de liofilización, mejoró significativamente el color del ají (Toontom et al., 2012).

En la Figura 3, se presenta la cinética de rehidratación de los tratamientos liofilizados del ají rocoto sin semilla y con semilla, donde se evidencian interacciones entre los niveles de la programación y la presencia o ausencia de semilla.

La velocidad de secado influyó directamente sobre la capacidad de rehidratación de los tratamientos, la cual alcanzó a los 10 min valores de 0,49; 0,52 y 0,62 para las programaciones de calentamiento 1, 2 y 3, respectivamente, en los frutos sin semilla. En los frutos con semilla, los valores fueron de 0,45; 0,59 y 0,59 para las mismas programaciones. La presencia o ausencia de semillas no permitió inferir diferencias significativas ($P > 0,05$) entre los tratamientos, lo cual está acorde con lo reportado por Vargas (2015). No obstante, se evidenciaron diferencias entre las programaciones de calentamiento ($P \leq 0,05$), lo que indica una mayor capacidad de rehidratación en los tratamientos de la programación 3 y menor capacidad en la programación 1. Esto estaría en concordancia con lo reportado en otros estudios, donde el producto liofilizado tendió a rehidratarse más cuando las temperaturas de la placa de calentamiento del liofilizador fueron menores (Arriola et al., 2006). De acuerdo a lo anterior podría inferirse que las rampas de calentamiento estarían relacionadas con

una menor afectación de la estructura del vegetal, permitiendo una mayor capacidad de rehidratación al producto liofilizado y pulverizado.

En la Figura 4 se muestran las microfotografías del tejido estructural de forma de colmena de las muestras de ají rocoto liofilizadas antes de la pulverización. Se puede observar que en las tres programaciones de liofilización hubo una afectación de las paredes celulares, ya que aunque se aprecian espacios volumétricos aptos para la probable rehidratación del producto final, también existen zonas donde

posiblemente se afectó la microestructura. Lo anterior puede ser la causa más probable de la disminución en la capacidad de hidratación del tejido (Marín et al., 2006). Sin embargo, puede considerarse que la programación tres, pudo presentar una menor afectación de la estructura ya que se observa en la Figura 4C un menor deterioro en los espacios porosos y mayor continuidad en los bordes de las paredes celulares. Esto podría permitir una mayor capacidad de rehidratación, aspecto que sería muy positivo para el probable uso futuro del material vegetal.

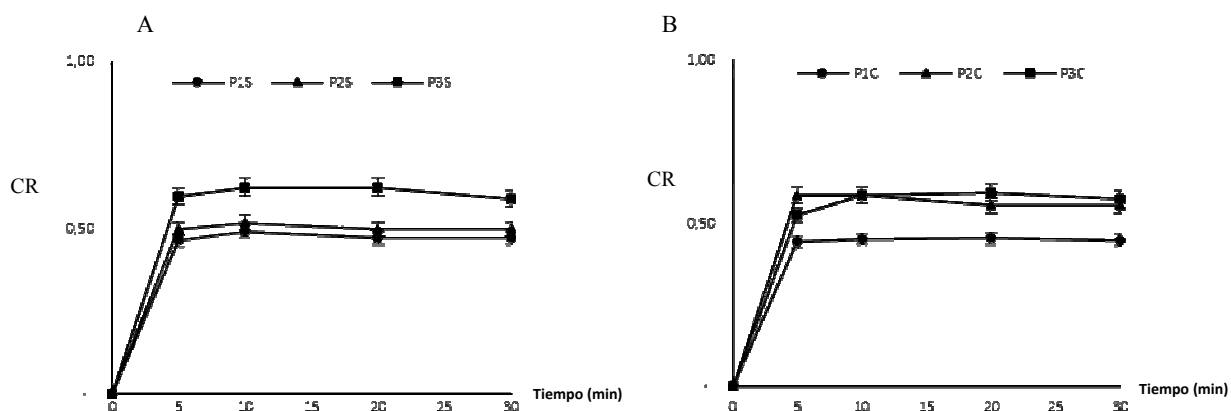


Figura 3. Capacidad de rehidratación de las muestras de ají rocoto liofilizado y molido; frutos sin semillas (A); frutos con semillas (B). Valores promedio de las tres programaciones

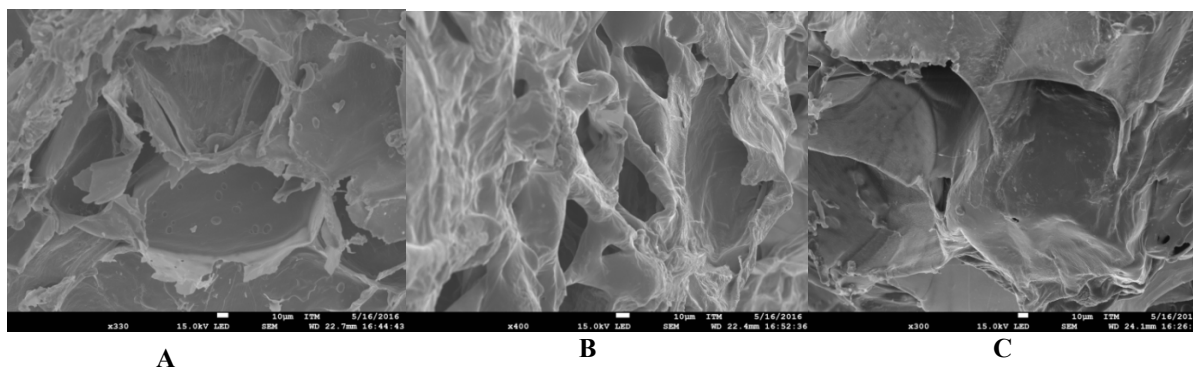


Figura 4. Fotografías mediante microscopía electrónica de barrido del tejido estructural de las muestras de ají rocoto, sin semillas, liofilizadas por las tres programaciones, antes de la pulverización: Programación 1 (A); Programación 2 (B); Programación 3 (C)

CONCLUSIONES

Las programaciones de calentamiento durante la sublimación no afectaron significativamente las características físico-químicas de porcentaje de

humedad, a_w , pH y acidez del ají rocoto.

El método de liofilización mejoró la luminosidad (L^*) y cromaticidad (C^*) del ají rocoto con respecto al producto en fresco, además aumentó los atributos de color b^* y h° , pero no

afectó el color a* conservando el color rojo general característico del producto fresco.

Los frutos con semilla necesitaron mayor tiempo para alcanzar las temperaturas de congelación y de sublimación.

La programación tres, con menor tasa de calentamiento durante la sublimación, presentó una mayor capacidad de rehidratación del producto, aspecto que es positivo para el uso futuro de este material vegetal.

AGRADECIMIENTO

Al personal de los laboratorios de Frutas y Hortalizas y de Control de Calidad de alimentos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y al técnico Fernando Arenas Gil.

LITERATURA CITADA

1. Abdelwahed, W., G. Degobert, S. Stainmesse y H. Fessi. 2006. Freeze-drying of nanoparticles: Formulation, process and storage considerations. *Advanced drug delivery reviews* 58(15): 1688-1713.
2. Amores, D. 2011. Evaluación nutritiva y nutracéutica de la mora de castilla (*Rubus glaucus*) deshidratada por el método de liofilización y comparación con la obtenida por deshidratación en microondas y secador en bandejas. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 100 p.
3. AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2005. *Official Methods of Analysis. Fruits and fruit products.* Chapter 37. Arlington, VA, USA.
4. Arriola-Guevara, E., T. García-Herrera, G. Guatemala-Morales, J. Nungaray-Arellano, O. González-Reynoso y J. Ruíz. 2006. Comportamiento del aguacate Hass liofilizado durante la operación de rehidratación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5: 51-56.
5. Ayala, A., L. Serna y E. Mosquera. 2010. Liofilización de Pitahaya Amarilla (*Selenicereus Megalanthus*). *Revista de la Facultad de Química y Farmacia. Vitae* 17(2): 121-27.
6. Bancóldex (Banco de Desarrollo Empresarial y Comercio Exterior de Colombia). 2014. Programa de Transformación Productiva. Ministerio de Comercio de Industria y Turismo. Colombia. 28 p.
7. Ceballos, A., G. Giraldo y C. Orrego. 2012. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *Journal of Food Engineering* 111(2): 360-365
8. Departamento Nacional de Planeación (DNP). 2015. Plan Nacional de Desarrollo del Cuatrienio 2014-2018. Bogotá. 793 p.
9. Duan, X., M. Zhang, A. S. Mujumdar, y R. Wang. 2010. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods. *Drying Technology* 28(4): 444-453.
10. Echandi, C. 2005. Estabilidad fenotípica del rendimiento y adaptación en líneas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) durante la época lluviosa en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(2): 27-44.
11. García, M., I. Gómez, C. Espinoza, F. Bravo, y L. Ganoza. 2009. *Tablas Peruanas de Composición de Alimentos.* Lima, Perú: Ministerio de Salud, Centro Nacional de Alimentación y Nutrición. 70 p.
12. Gill, A. y M. Ruiz. 2010. *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad nutritiva de los Alimentos.* Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
13. González, A., A. Espinoza, A. Cañizares, y J. Méndez. 2008. Obtención de un polvo de ají dulce (*Capsicum chinense*) producido mediante deshidratación por aire forzado. *Revista Científica UDO Agrícola* 8(1): 118-26.
14. Krokida, M., V. Karathanos, Z. Maroulis, y D. Marinos. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59(4): 391-403.
15. Marín E., R. Lemus M, V. Flores y A. Vega. 2006. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición* 33(3): 527-538.
16. Martínez, J. y L. Ordóñez. 2015. Efecto del procesamiento térmico sobre el color superficial del pimentón rojo (*Capsicum annuum*) variedad "Nataly". *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 13(2): 104-13.
17. Martínez, N., A. Andrés, A. Chiralt, y P. Fito. 1998. *Termodinámica y Cinética de Sistemas:*

- Alimento Entorno. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 372 p.
18. Maskan, M. 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 169-75.
 19. Meckelmann, S., C. Jansen, D. Riegel, M. Zonneveld, L. Ríos, K. Peña, E. Mueller-Seitz y M. Petz. 2015. "Phytochemicals in native peruvian *Capsicum pubescens* (Rocoto). *European Food Research and Technology* 241(6): 817-25.
 20. Mohammad, A., R. Shahin, E. Zahra, y K. Alireza. 2008. Kinetic models for colour changes in kiwifruit slices during hot air drying. *World Journal of Agricultural Sciences* 4(3): 376-83.
 21. Orrego, C. 2008. Congelación y Liofilización de Alimentos. Edit. Artes Gráficas Tizán y Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. 172 p.
 22. Palta, E. y A. Guevara. 2002. Efecto del tiempo de escaldado y temperatura de deshidratación en la retención del color y picantes de rocoto (*Capsicum pubescens* R y P) verde en polvo. *Anales Científicos - Universidad Nacional Agraria La Molina* 53(4): 141-62.
 23. San Martín-Hernández, C., V. Ordaz-Chaparro, P. Sánchez-García, M. Berryl-Colinas y L. Borges-Gómez. 2012. Calidad de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferente granulometría de tezontle. *Agrociencia* 46(3): 243-54.
 24. Ramírez, J. 2006. Liofilización de Alimentos. Cali, Colombia: Revista ReCiTeIA, Universidad del Valle. 236 p.
 25. Shishegarha, F., J. Makhlof, y C. Ratti. 2002. Freeze-drying characteristics of strawberries. *Drying Technology* 20(1): 131-45.
 26. Toontom, N., M. Meenune, W. Posri, y S. Lertsiri. 2012. Effect of drying method on physical and chemical quality, hotness and volatile flavour characteristics of dried chilli. *International Food Research Journal* 19(3): 1023-31.
 27. Topuz, A., C. Dincer, K. Sultan- Özdemir, H. Feng y M. Kushad. 2011. Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv. Jalapeno). *Food Chemistry* 129(3): 860-65.
 28. Vargas, D. 2015. Efecto de la liofilización sobre propiedades fisicoquímicas y vida útil de cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal) en polvo. Tesis. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Colombia. 173 p.
 29. Villota, R. y J. Hawkes. 2006. Reaction kinetics in food systems. *Handbook of Food Engineering. Food Science and Technology* 2: 125-286.
 30. Yamamoto, S., T. Djarwaningsih y H. Wiradinata. 2013. *Capsicum pubescens* (Solanaceae) in Indonesia: Its History, taxonomy, and distribution. *Economic Botany* 67(2): 161-70.
 31. Yun-Hon, J. 2015. Evaluación de las variedades de ají *Capsicum* spp. piri piri (*C. frutescens*), tabasco (*C. frutescens*) y de árbol (*C. annuum*), para la elaboración de una salsa picante agridulce. Tesis. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. 58 p.