

OPTIMIZACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE IMÁGENES DIGITALES

Ing. Fabiana N. Altobelli – fabi_altobelli@yahoo.com.ar

Federico Albesa – feddealbesa@hotmail.com

Dr. Miguel A. Condori – miguel.angel.condori@gmail.com

Universidad Nacional de Salta, Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)

Resumen. En el presente trabajo se evalúa la utilidad del análisis de imágenes para describir las etapas del secado de productos agrícolas, con intenciones de optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto final. Mediante un secador construido a escala de laboratorio se realizó la captura continua de imágenes digitales a través de una pequeña ventana de doble vidrio, como así también el seguimiento de otras variables del proceso de secado incluida la medición de los cambios de temperatura y humedad del aire y el peso del producto. Para el análisis de las imágenes fue empleado el modelo de color HSV y el seguimiento en el tiempo del valor promedio y la desviación estándar de los canales del matiz (H), la saturación (S) y el brillo (V) de una imagen recortada, para correlacionarlas con la variación de la textura del producto; fue utilizado para ello el lenguaje Scilab de programación y su herramienta para el procesamiento de imágenes SIVP. Se practicó el secado de dos cargas de tabaco tipo Virginia y dos cargas de pimiento para pimentón. A partir de las experiencias se determina que el valor promedio de H y su desviación estándar, constituyen buenos indicadores de la evolución del proceso de secado de estos productos agrícola. Quedan todavía por realizarse mayores experiencias, con el fin de definir claramente el beneficio de su empleo como herramienta de control y optimización. De confirmarse, su potencialidad se hallaría no solamente en una mejora cualitativa de los productos secados sino también en un uso más eficiente del recurso energético.

Palabras clave: Secado, Procesamiento de imágenes, Productos agrícolas

1. INTRODUCCIÓN

El deshidratado de productos agrícolas con flujo de aire caliente representa una técnica simple y efectiva de conservación de alimentos (Belessiotis y Delyannis, 2011). Además de los fines de preservación, en muchos casos se busca concentrar propiedades organolépticas y facilitar el fraccionamiento y comercialización de los mismos (Romano et al., 2012). Como ejemplo de esto, pueden mencionarse especies aromáticas tal como el pimiento para pimentón, orégano, etc. Por otro lado, existen otros tipos de productos que deben pasar por un proceso de secado para su posterior consumo, como es el caso del tabaco (*Nicotiana tabacum*).

Cualquiera sea el tipo de producto a deshidratar, las variables humedad y temperatura son consideradas de mayor peso, pero también se le presta especial atención al color del producto. En muchos casos esta responsabilidad recae sobre un personal a cargo del proceso. Se requiere mano de obra especializada, tornándose en uno de los elementos fundamentales de la cadena productiva. Con respecto al tabaco, se sabe que el trabajo de meses en el campo puede verse malogrado con un curado defectuoso (López Méndez, 2010).

En este contexto, la calidad final del producto, con influencia directa en su valor comercial, es determinada a priori desde un punto de vista colorimétrico. El color es un parámetro ampliamente usado en la valoración de madurez, frescura, condición nutricional y factores de crecimiento de productos agrícolas (Zhang et al., 1998). Para ejemplificar esto, se puede mencionar la clasificación del pimentón según el sistema ASTA (American Spice Trade Association) (Krajayklang, 2000; Banout, 2011). Es posible entonces definir una nueva variable para ser considerada en el control del proceso de secado de productos agrícolas, siendo la misma una variable de tipo colorimétrica.

Contar con una herramienta de análisis visual continua del producto permitiría optimizar el proceso de secado, identificando claramente los momentos de cambio de etapa, elevación o disminución de la temperatura, apertura de ventanas para intercambio de aire, etc. Esto no sólo redundaría en una mejora cualitativa del producto, sino también tendría efecto directo sobre la demanda energética que se requiere para ello. La región Noroeste de la República Argentina cuenta con numerosos emprendimientos de deshidratado de productos agrícolas, ya sea con asistencia o íntegramente dependientes de energía solar (Espinoza y Saravia, 2010). En estos sistemas de sustitución de fuentes convencionales de energía, el control del proceso continúa siendo un factor de gran preocupación por parte de los productores.

En la actualidad los dispositivos digitales de adquisición de imágenes han evolucionado al punto de ser prácticamente accesible a la gran mayoría. Si bien existen numerosos trabajos relacionados con el análisis de imágenes con fines de clasificación de la calidad de productos agrícolas, son pocos los antecedentes sobre el empleo de imágenes para la optimización y control del proceso de secado (Zhang et al., 1997; Zhang et al., 1998). Sin embargo, como señala

Brosnan et al. (2002), esta técnica ofrece el potencial de automatizar las prácticas de clasificación manual, estandarizar las técnicas y eliminar las tediosas tareas de inspección.

En el presente trabajo se planteó entonces el diseño y prueba de un sistema de seguimiento con recopilación y análisis de imágenes digitales del producto, con el fin de desarrollar una herramienta de optimización y control del proceso de secado. El trabajo representa un primer avance hacia la obtención del mencionado sistema buscando caracterizar la evolución del color y la textura del producto a lo largo del proceso. Se practicó en laboratorio el secado de dos productos agrícolas de gran importancia en la región: tabaco y pimiento para pimentón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sistema de secado en laboratorio

La reproducción del proceso de secado consistió en la construcción de un prototipo secador con recirculación a escala de laboratorio. El mismo fue realizado con lana de virio rígida de bajo peso y caras en aluminio (Climaver de ISOVER). Como fuente de calor fue incluida una resistencia eléctrica de 600 W, mientras que fue incorporado un ventilador axial de 15cm de diámetro como forzador del flujo de aire. En la estructura de la cámara de secado se instaló una ventana con doble vidrio (con el fin de evitar pérdidas térmicas), a partir de la cual pudo realizarse un seguimiento del proceso con registro de imágenes (Fig. 1).

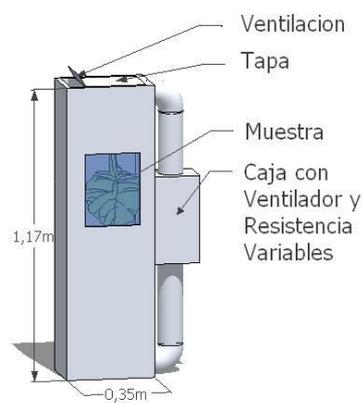


Figura 1 – Esquema del secador utilizado durante la experiencia.

El registro de temperaturas fue realizado mediante la utilización de termocuplas tipo K (debidamente calibradas), las cuales se hallaban a su vez conectadas a un adquisidor de datos (ColeParmer); para este caso el tiempo de registro fue definido cada 10 minutos. Se incorporaron también sensores y adquisidores de humedad y temperatura inalámbricos (NOVUS).

En total fueron secadas dos cargas de hojas de tabaco tipo Virginia, proveniente de la localidad de Vaqueros (provincia de Salta), tratando de respetar las etapas definidas para este producto (López Méndez, 2010). También se practicó el secado de pimiento para pimentón, proveniente de la localidad de San Carlos (Provincia de Salta), zona con tradición de producción vitivinícola y pimentonera.

2.2. Metodología de procesamiento de Imágenes

El protocolo para la recopilación y posterior análisis de imágenes digitales fue desarrollado en lenguaje Scilab, específicamente se emplearon funciones de Scilab 5.3.3 y del paquete de SIVP - Scilab Image and Video Processing Toolbox. Como hardware se empleó una cámara digital de 2 Mega pixeles, conectada a una computadora portátil como adquisidor.

El procesamiento de las imágenes fue realizado siguiendo el modelo de color HSV (Hue, Saturation, Value): evaluando la evolución del valor promedio de estos canales y de la desviación estándar del matiz (H) para cada imagen. El modelo HSV separa las componentes de intensidad y color de una imagen, permitiendo una descripción más intuitiva del mismo. H es un atributo que describe al color puro (naranja, amarillo, azul, etc.) y se obtiene a partir de las coordenadas RGB tomando un plano que contenga al blanco (1,1,1), al negro (0,0,0) y al color en cuestión (R,G,B). Si se toma como referencia el punto (1,0,0) y se realiza la rotación de un plano desde 0° a 360° se obtienen distintos ángulos θ para cada punto en el cubo RGB; el valor de éste ángulo normalizado es H. La intensidad (V) está relacionada con el brillo de un color. Se obtiene trazando un plano que contenga al punto RGB a transformar y que sea perpendicular al segmento que une al blanco y el negro en el cubo RGB. La distancia al punto donde se corta este segmento es el valor de la intensidad también llamado Value (V). La saturación (S) es una medida del grado con el cual

un color puro es diluido con luz blanca. Se obtiene tomando la distancia del punto al segmento que une al blanco y el negro en el cubo RGB.

El contenido de textura de una imagen puede seguir los cambios superficiales del producto durante el secado. A partir de la imagen puede ser determinada por métodos estadísticos, de manera de clasificar la textura en suave, rugosa, granulosa, etc. En este trabajo se propone considerar la desviación estándar respecto al valor promedio de H para la totalidad de puntos que conforman cada imagen. Se esperan valores bajos para superficies suaves, y un valor mayor a medida que la superficie presenta más irregularidades. (González y Woods, 2001).

La captura de imágenes a intervalos regulares se llevó a cabo usando las instrucciones ‘camopen’ para activar la cámara, ‘avireadframe’ para capturarla, ‘imwrite’ para grabarla en un archivo. Luego, se practicó un recorte de las imágenes con el objetivo de limitar el producto bajo análisis (hoja de tabaco, vainas de pimiento). Esto fue realizado mediante el empleo de la instrucción ‘imcrop’ (Fig. 2).



Figura 2 – Imagen original (izq.) e imagen recortada (der.).

La transformación posterior de la imagen recortada fue realizada con la función ‘rgb2hsv’, que convierte la imagen RGB al sistema HSV, obteniendo como resultado la descomposición de la misma en los canales H, S y V (Fig. 3).

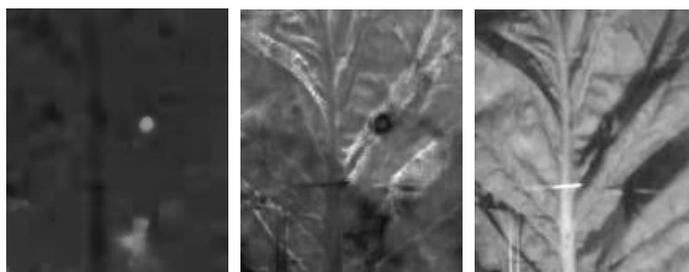


Figura 3 – Imágenes resultantes de los canales H, S y V (de izq. a der.).

Finalmente se calcularon los valores promedios para cada canal con la instrucción ‘mean2’ y los desvíos estándar de cada canal con la instrucción ‘std2’, siendo estos últimos valores los que luego fueron graficados y analizados en función de la secuencia temporal de las tomas.

3. RESULTADOS

3.1. Tabaco

La primera carga de tabaco fue secada en un período de 6 seis días, mientras que para la segunda fueron requeridos 7 días. En ambos casos se respetaron las etapas del curado, obteniéndose las secuencias de imágenes (Fig. 4 y Fig. 5).

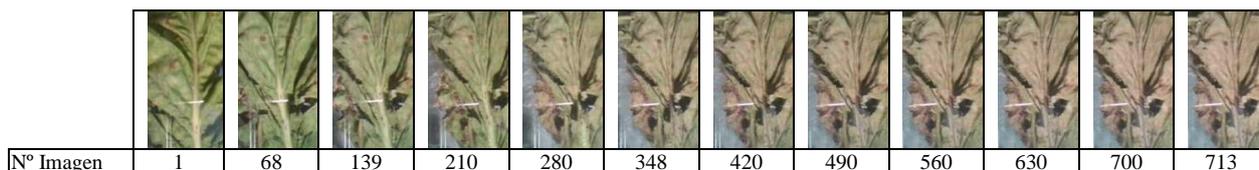


Figura 4 - Secuencia de imágenes obtenida de la primera carga de tabaco.

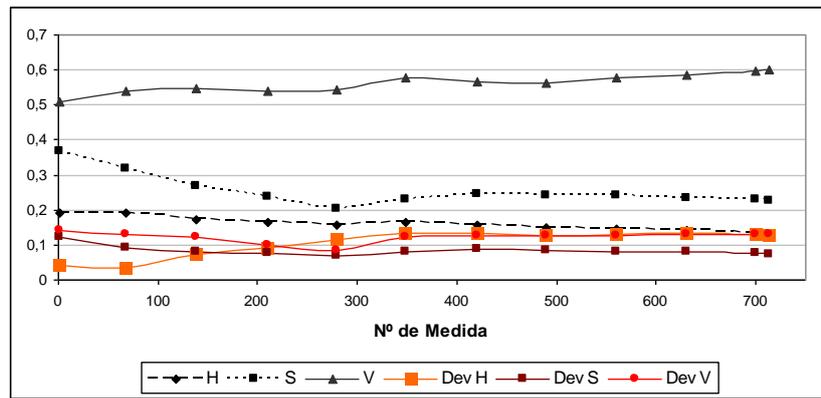


Figura 5 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la primera carga de tabaco.

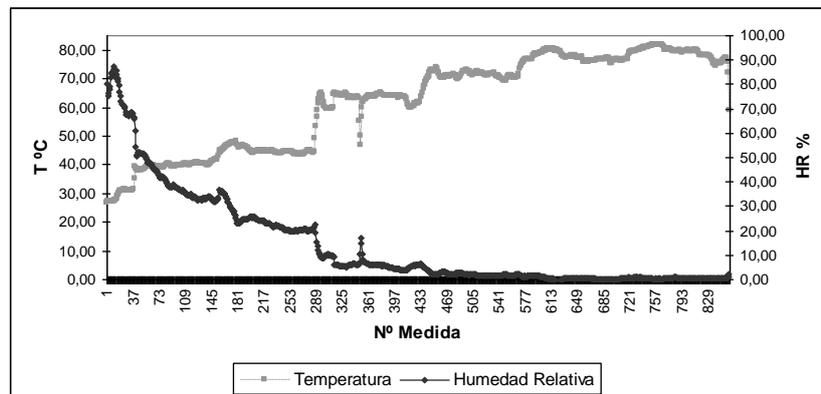


Figura 6 - Evolución de temperatura y humedad durante el curado de la primera carga de tabaco.

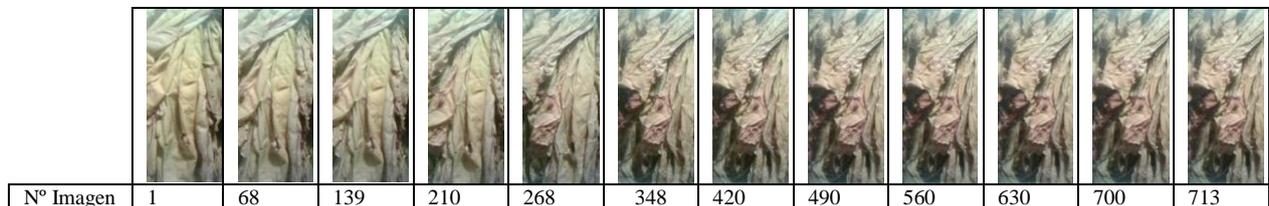


Figura 7 - Secuencia de imágenes obtenida de la segunda carga de tabaco.

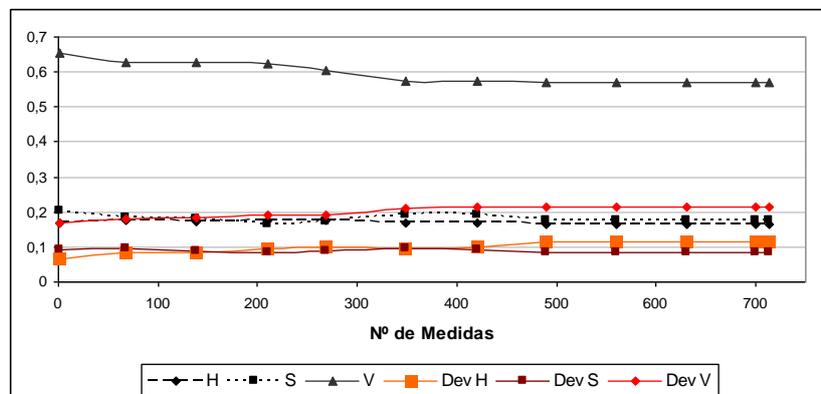


Figura 8 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la segunda carga de tabaco.

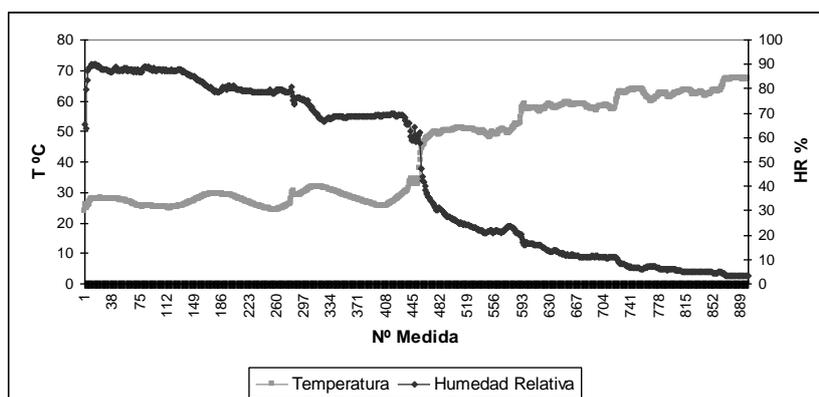


Figura 9 - Evolución de temperatura y humedad durante el curado de la segunda carga de tabaco.

La hojas correspondientes a la primera carga de tabaco ingresaron al secador con una tonalidad más verdosa, esto se pone de manifiesto en su mayor valor inicial de H ($H = 0,189492$ vs. $H = 0,167589$). Luego, la evolución del color se mostró más satisfactoria para la primera al lograr un tono de mayor proximidad al deseado para el tabaco curado, según las especificaciones de calidad comercial. El monitoreo por imágenes permitió comprobar el cumplimiento de las cuatro etapas de curado que requiere este producto: amarillamiento, fijación de color, secado de lámina y secado de nervadura (López Méndez, 2010). El cambio total de matiz al finalizar el secado fue $\Delta H = -0,059176$ para la primera mientras que para la segunda $\Delta H = -0,004754$ (Fig. 1 y Fig. 3).

Por otro lado, en la primera carga la desviación estándar del valor promedio de H crece uniformemente hasta la medida 400, luego disminuye un poco y permanece sin grandes variaciones hasta el final del secado. En la segunda carga la variación es más uniforme durante todo el proceso, observándose algunos escalones entre las medidas 50 y 150; 200 y 500; 500 y 713. La variación total de textura para la primera carga es $\Delta \text{Dev H} = 0,085763$ mientras que para la segunda es $\Delta \text{Dev H} = 0,0495$. Esto puede ser explicado por la posición en la que ingresaron las hojas al secadero, quedando con una disposición mejor en la primera carga. También se incluye como causa el estado de las hojas al inicio del curado; en la segunda carga éstas ingresaron casi amarillas (esto es un estado más avanzado del proceso), su desviación Dev H al comenzar fue $0,066254$ y al finalizar fue $0,115754$. Para la primera carga, por su parte, al comenzar la desviación Dev H fue $0,041957$ y al finalizar fue $0,12772$. Puede apreciarse la relación directa que existe entre el valor que describe a la textura y la fase del proceso (Fig. 1 y Fig. 3).

En lo que respecta a los valores de temperatura, para la primera carga se logró reproducir mejor la curva de curado practicada en estufas reales, con representación de los ascensos y mesetas característicos. Sin embargo, se aprecia que para el primer caso se tiene una temperatura de 45 °C aproximadamente en la medida 300 mientras que en la segunda carga para ese número de medida se registran valores inferiores a los 30 °C , hecho que se mantiene aproximadamente hasta la medida 400. Luego se produce un salto de 25 °C a 50 °C en un lapso de 100 mediciones (Fig. 2 y Fig. 4).

La humedad relativa ambiente dentro del secador fue menor a la ideal en ambos casos (para la etapa de amarillamiento son requeridos valores de humedad próximos a la saturación). A pesar de esto, en la segunda carga se consiguió un mejor ajuste con regulación de las mezclas de aire a través de la ventanilla superior del secador. Los mayores cambios de humedad relativa se registran entre las medidas 0 a 350 en la primera carga y desde la medida 400 a 500 en la segunda (Fig. 2 y Fig. 4).

3.2. Pimiento

Las dos cargas de pimiento que fueron secadas, tardaron en promedio 2 días. La diferencia temporal con respecto al tabaco se debe al hecho de que para el pimiento simplemente se practica un deshidratado, y a que el producto fue segmentado previo a su secado.

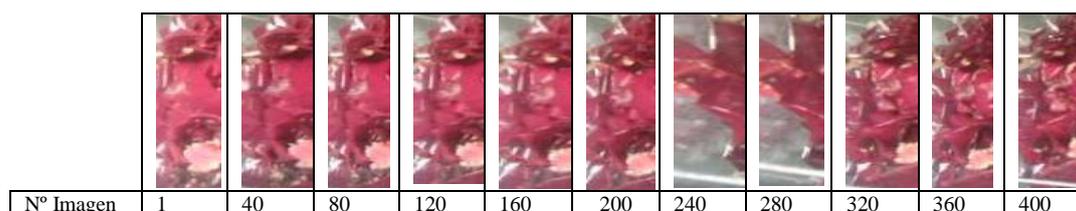


Figura 10 - Secuencia de imágenes obtenida de la primera carga de pimiento.

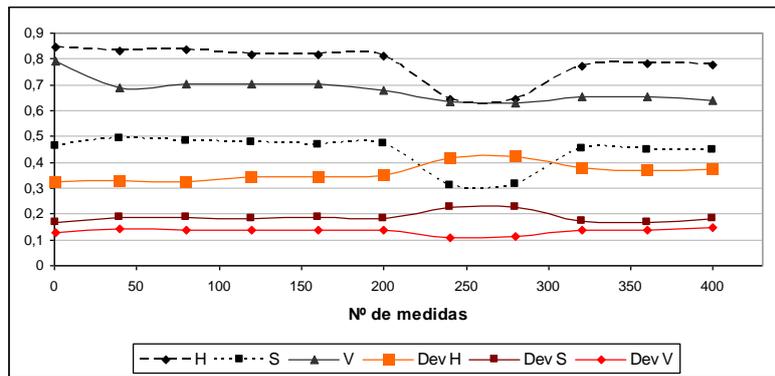


Figura 11 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la primera carga de pimienta.

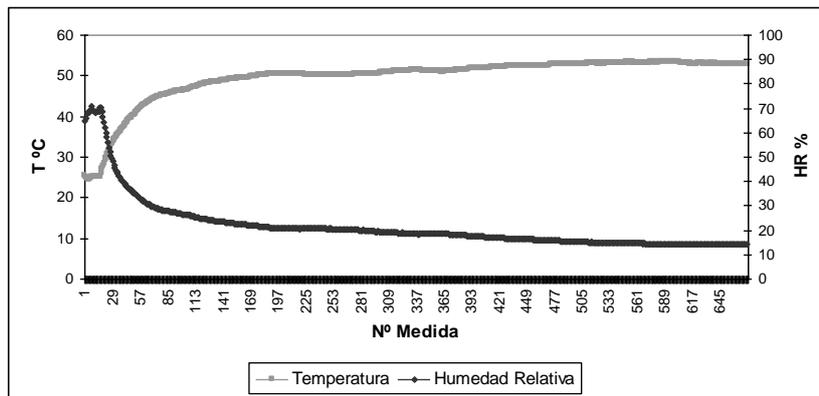


Figura 12 - Evolución de temperatura y humedad durante el secado de la primera carga de pimienta.



Figura 13 - Secuencia de imágenes obtenida de la segunda carga de pimienta.

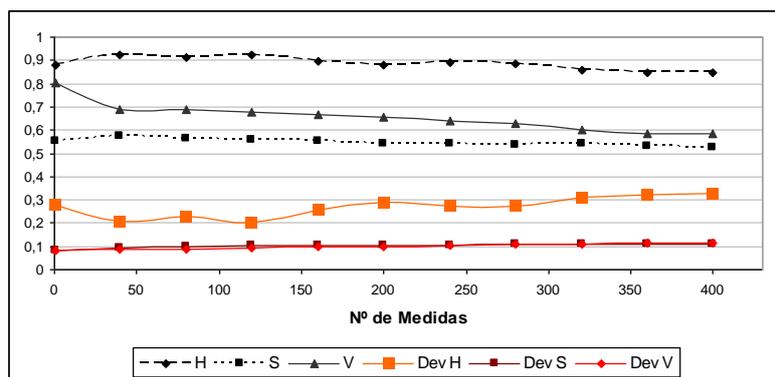


Figura 14 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la segunda carga de pimienta.

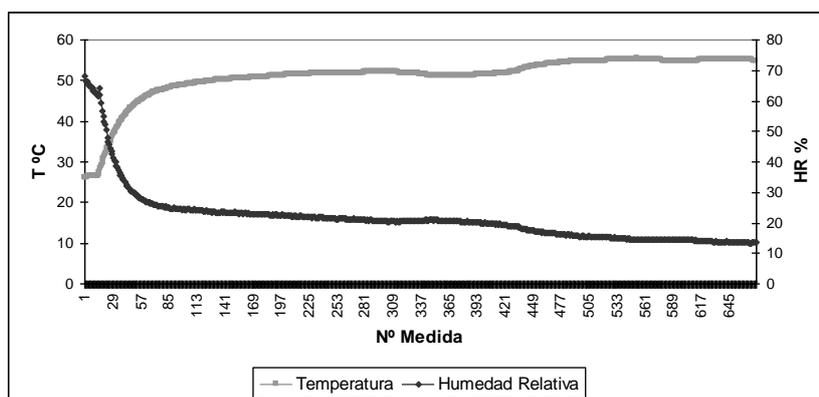


Figura 15 - Evolución de temperatura y humedad durante el secado de la segunda carga de pimienta.

El valor del matiz H inicial para la primera y segunda carga fue 0,844193 y 0,882396 respectivamente, mientras que la variación total después del secado fue $\Delta H = -0,068916$ y $\Delta H = -0,037431$. Los valores alejados de la tendencia entre las medidas 220 y 300 durante el primer ensayo se deben a un movimiento involuntario de la cámara, lo que modificó el ángulo de toma de las imágenes (Fig. 5 y Fig. 7).

Para los tres canales analizados (H, S y V), la tendencia general es disminución a medida que el proceso avanza. Esto puede ser entendido como el resultado del cambio de tonalidad experimentado por el pimienta al pasar de un tono más bien claro (rojo-anaranjado) hacia otro oscuro (rojo-bordó). Se observan caídas pronunciadas del valor V en las primeras 50 medidas para ambas cargas. Es precisamente éste canal el que muestra mayor variación total ($\Delta H = -0,037431$; $\Delta S = -0,028647$; $\Delta V = -0,221642$) y ($\Delta H = -0,068916$; $\Delta S = -0,017125$; $\Delta V = -0,151949$) para ambas cargas.

Asimismo, se observa claramente que la desviación estándar del valor promedio de H aumenta uniformemente durante todo el secado, siendo la variación total $\Delta \text{Dev H} = 0,052859$ y $\Delta \text{Dev H} = 0,049423$ para la primer y segunda carga. Debido a que el producto fue segmentado previo a su carga en el secador, es comprensible que la eliminación de su contenido de humedad repercute en un aumento de la textura registrada por las imágenes (Fig. 5 y Fig. 7).

En lo que concierne a la temperatura, el secado se realiza mayormente a valor constante a partir de la medida número 100 con registros que varían entre 45 °C y 55 °C en ambos casos. Esta situación es compatible con las temperaturas definidas como óptimas para el secado del pimienta. Con respecto a la humedad, la misma decae inversamente con el aumento de temperatura, tal como podría esperarse, para finalmente estabilizarse alrededor de 20 % HR (Fig. 6 y Fig. 8).

4. CONCLUSIONES

A partir de las experiencias se determina que el valor promedio de H y su desviación estándar, medidos a partir del procesamiento de imágenes digitales, constituyen buenos indicadores de la evolución del proceso de secado de productos agrícola. En particular el valor de H al inicio del secado puede indicar el estado de maduración del producto a secar, por ejemplo para el caso del tabaco se podría identificar las hojas con un valor concreto: $H = 0,189492$ para hoja verde y $H = 0,167589$ para hoja amarilla (Fig. 4 y Fig. 5). Esto permitiría establecer un criterio para el tiempo de ‘ventilación’ del producto dentro de la estufa. Los valores obtenidos para la diferencias del valor del matiz H a través del tiempo permiten ponderar la ‘calidad’ del secado.

Para el caso del tabaco, a pesar de que en ambas cargas se logró una buena deshidratación del producto, la calidad del mismo fue desigual, este hecho puede cuantificarse con el valor ΔH , siendo el mismo mayor para el primer caso ($\Delta H = -0,059176$ vs. $\Delta H = -0,004754$). El valor de H para la hoja de tabaco curada debería encontrarse alrededor de 0,130316 que es el valor obtenido para la primera carga calificada como “satisfactoria”. Por otro lado, y para la segunda, se descarta el valor $H = 0,162835$ por calificarse como curado “malo” (López Méndez, 2000). Esto puede explicarse por el hecho de que en la segunda experiencia no se logró una buena reproducción de las curvas de temperatura y humedad recomendadas; se evidencia entonces la influencia de estas variables en la calidad final y la necesidad de su control.

Con respecto al pimienta, los ensayos muestran la sensibilidad del método para detectar variaciones de la intensidad del color, en este caso “rojo”, el canal apropiado resulta ser el del valor V (Fig. 5 y Fig. 7). Observando las curvas de temperatura, humedad y del canal V, parece razonable establecer una relación directa entre las variaciones de éstas magnitudes. Se deberían realizar más experimentos para corroborar ésta hipótesis.

En referencia a la desviación estándar del valor de H como indicador de la textura, parece ser éste el mejor indicador comparándolo con las desviaciones estándar de los otros dos canales S y V. Como era de esperar, su valor crece a medida que el producto se seca como consecuencia de que la superficie aumenta su rugosidad. Comparando las gráficas de humedad relativa ambiente dentro del secador y la textura para el tabaco, se intuye que los cambios de textura están relacionados con los cambios de humedad relativa (entre medidas 0 a 350 en la primer carga y 400 a 500 en la segunda, se observan las mayores variaciones de humedad relativa y también de la desviación del valor promedio

de H). Con respecto a la textura de los pimientos, la segunda carga presenta oscilaciones de tendencia creciente durante todo el secado, a diferencia de la primera donde la tendencia es constante. La bibliografía existente menciona el hecho de que para el caso del pimiento, la textura brinda información suficiente sobre su contenido de humedad (Romano et al., 2012). La repetición del experimento y el análisis cualitativo del producto permitirá establecer con mayor precisión un criterio acerca de las condiciones iniciales, intermedias y finales para conseguir secados más eficientes y productos de mayor calidad.

Puede concluirse en la gran utilidad del sistema propuesto para caracterizar el proceso de secado de los productos ensayados. Quedan todavía por realizarse mayores experiencias, definiendo estándares de captura y análisis de datos para establecer criterios de repetibilidad y reproducibilidad, con el fin de definir claramente el beneficio de su empleo como herramienta para el control y optimización del secado. De confirmarse esto, su potencialidad no se hallaría solamente en una mejora cualitativa de los productos secados sino en un uso eficiente del recurso energético.

REFERENCIAS

- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., Verner, V. 2011. Design and performance evaluation of a double-pass solar drier for drying red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar Energy*, 85, 506-515.
- Belessioti, V, Delyannis, E. 2011. Solar Drying. *Solar Energy*, 85, 1665-1691.
- Brosnan, T., Sun, Da-Wen., 2002. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision system: a review. *Computers and Electronics in Agricultural*, 36, p. 193–213.
- Echazú, R.; Quiroga, M.; Durán, G.; Altobelli, F. 2010. Medición de color en pimiento secado con energía solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, p 09.13 – 09.18. ISSN 0329-5184. XXXIII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, ASADES 2010. Cafayate, Salta
- Espinoza, R., Saravia, L. 2010. Secado Solar de Productos Agroalimentarios en Iberoamérica. Red Iberoamericana de Secado Solar de Productos Agroalimentarios RISSPA. Salta, Argentina.
- Gonzalez, R., Woods, R. 2001. *Digital Image Processing*. Second Edition. Ed. Prentice Hall. New Jersey, United States of America.
- Krajayklang, M.; Klieber, A.; Dry, P. 2000. Colour at harvest and post-harvest behavior influence paprika and chilli spice quality. *Postharvest Biology and Technology*, 20, 269-278.
- López Méndez, A. 2000. El curado del tabaco Virginia en España. Manual práctico para todos los agricultores. Enciclopedia básica del cultivo de tabaco. España.
- Romano, G., Argyropoulos, D., Nagle, M., Khan, M.T., Müller, J. 2012. Combination of digital images and laser Light to predict moisture content and color of bell pepper simultaneously during drying. *Journal of Food Engineering*, 109, 3, p. 438-448.
- Zhang, J., Sokhansanj, S., Wu, S., Fang, R., Yang, W. 1997. A trainable grading system for tobacco leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 16, p. 231-244.
- Zhang, J., Sokhansanj, S., Wu, S., Fang, R., Yang, W., Winter, P. 1998. A transformation technique from RGB signals to the Munsell system for color analysis of tobacco leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 19, p. 155-166.

OPTIMIZATION AND CONTROL OF AGRICULTURAL PRODUCTS DRYING PROCESS USING DIGITAL IMAGES PROCESSING

Abstract. *This paper evaluates the usefulness of images processing to describe the drying stages of agricultural products, intending to optimize and improve the final quality. By means of a laboratory-scale dryer, a continuous image capture was performed through a double-glass window. Other drying variables such as temperature, humidity and product weight, were also measured. For the image analysis, the HSV color model was used and the tracking over time of average values as well as their standard deviations corresponding to hue (H), saturation (S) and value (V) channels, from a cropped image. These results were then compared to the texture variation. The Scilab programming language and its SVIP tool were employed for this purpose. Two loads of Virginia type tobacco and two loads of paprika pepper were dried. It can be determined from the experiment that the average value of H and its standard deviation are good indicators of the evolution of the drying process of these agricultural products. However, more experiences are needed in order to clearly define the benefits of its use as a control and optimization tool. If confirmed, its potential would be found not only in improving the dried products quality but also in a more efficient use of energy resources.*

Key words: *Drying, Image processing, Agricultural products*