

ANÁLISIS DE IMÁGENES DIGITALES PARA CARACTERIZAR EL PROCESO DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

F. Altobelli¹, F. Albesa², M. Condori

Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.
Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, mail: fabi_altobelli@yahoo.com.ar

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 26/09/12

RESUMEN: Se presentan los resultados del desarrollo de un sistema de toma y análisis de imágenes digitales, aplicado al seguimiento del proceso de secado de productos agrícolas. Dado que los aspectos colorimétricos poseen gran influencia en la calidad y en el precio de los mismos; la potencialidad del sistema está asociada a la optimización del secado desde el punto de vista del color final obtenido. Utilizando el sistema de color HSV, pudo determinarse que el valor promedio de H y su desviación estándar, medidos a partir del procesamiento de imágenes digitales aquí propuesto, constituyen buenos indicadores de la evolución del proceso de secado. Con respecto al pimiento, los ensayos muestran la sensibilidad del método para detectar variaciones de la intensidad del color, en este caso “rojo”, donde el canal apropiado resulta ser el V. Para el caso de tabaco, a partir de la correlación entre la evolución del peso de la carga y el canal del desvío de H, pudieron ser identificadas las cuatro etapas características de su proceso de curado. Se destaca la utilidad del sistema propuesto en miras a lograr la automatización y mejorar la eficiencia energética de este proceso.

Palabras clave: imágenes digitales, secado, productos agrícolas.

INTRODUCCIÓN

El proceso de secado de productos agrícolas comprende uno de los mecanismos más antiguos para conservación de alimentos (Belessiotis y Delyannis, 2011). Además de la conservación, también se practica por otras razones. Por ejemplo, existen productos cuyo deshidratado permite concentrar ciertas propiedades de tipo organolépticas como las especies aromáticas, tal es el caso del pimiento para pimentón, orégano, etcétera. En otros casos también se facilita su posterior fraccionamiento y comercialización (Romano et al., 2012). Por otro lado, existen productos como el tabaco (*Nicotiana tabacum*), que requieren pasar por un proceso de curado previo a su consumo.

Generalmente las variables temperatura, humedad y velocidad del aire son las únicas consideradas en el control del proceso; regulando cambios de etapas, aumentos de temperatura, caudal de aire. Sin embargo, para muchos productos se debe tener en cuenta el color final del producto. En muchos casos esta responsabilidad se encuentra delegada en un único empleado, tornándose en uno de los elementos fundamentales de la cadena productiva. En general se puede decir que todo el trabajo de campo puede verse malogrado con un secado defectuoso, López Méndez (2010).

En este contexto, la calidad final de muchos productos, 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. Existen antecedentes en el estudio de reflexión para el seguimiento del color de pimiento en la planta misma (Echazú et al, 2010), pero no de aplicar estas técnicas para realizar un seguimiento dentro del proceso de secado.

Contar con una herramienta de análisis visual continua del producto permitiría optimizar el proceso de secado, identificando claramente los momentos de cambio de etapa, aumento o disminución de la temperatura, cambios del volumen de aire circulante, 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 y la determinación del punto final de secado tanto en contenido de humedad como en color óptimo continúa siendo un factor de gran preocupación por parte de los productores.

¹ Becaria CONICET

² Alumno avanzado Licenciatura en Energías Renovables

En el presente trabajo se planteó 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 los cambios de 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Sistema

El sistema para la recopilación y posterior análisis de imágenes digitales fue desarrollado en lenguaje Scilab, específicamente se emplearon funciones de la versión Scilab 5.3.3 y del paquete SIVP - Scilab Image and Video Processing Toolbox. Como hardware se empleó una cámara digital de 2 Mega píxeles, conectada a una computadora portátil como adquisidor de datos (Figura 1 y Figura 2).

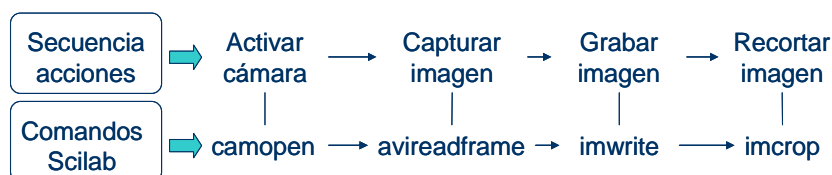


Figura 1 -.Comandos empleados para la toma y recorte de imágenes.



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

El procesamiento posterior de las imágenes obtenidas fue realizado siguiendo el modelo de color HSV (Hue, Saturation, Value): registrando la evolución temporal del valor promedio y de la desviación estándar de estos canales para cada imagen. El modelo de color HSV separa las componentes de intensidad y color de una imagen, permitiendo una descripción más intuitiva del mismo. El matiz (H) describe al color puro (naranja, amarillo, azul por ejemplo). La intensidad (V) está relacionada con la sensación de brillo de un color y la saturación (S) proporciona una medida del grado con el cual un color puro es diluido con luz blanca (Figura 3 y Figura 4).

El modelo de color más popular es el RGB donde el conjunto de todos los colores se representa en un cubo. Se puede hacer una transformación del sistema RGB al HSV: el matiz (H) 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 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 V. La saturación (S) 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 ser determinado mediante métodos estadísticos. De esta manera es posible clasificar la textura en suave, rugosa, granulosa, etc. También puede estimarse a partir de la desviación estándar del histograma de una imagen respecto al punto de mayor incidencia. En este trabajo se propone considerar la desviación estándar respecto al valor promedio del canal H para la totalidad de puntos que conforman cada imagen a fin de correlacionarla con el cambio de textura. Se esperan valores bajos para superficies suaves, y un valor mayor a medida que la superficie presenta más irregularidades. (González y Woods, 2001). También se propone estudiar el canal V como indicador del cambio de color, para colores menos brillantes se esperan los valores más bajos.



Figura 3 – Proceso de descomposición de imágenes en sistema HSV y análisis de cada canal.

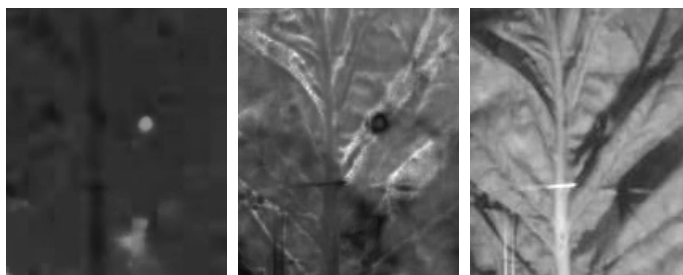


Figura 4 – Imágenes resultantes de los canales H, S y V (de izq. a der.).

Secador a escala de laboratorio

La reproducción del proceso de secado consistió en la construcción de un prototipo secador con recirculación a escala de laboratorio. El mismo fue construido con paneles de lana de vidrio rígida de bajo peso y ambas 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 (evitando pérdidas térmicas), a partir de la cual pudo realizarse un seguimiento del proceso con registro de imágenes mediante una cámara digital de 2 megapíxeles (Figura 5).

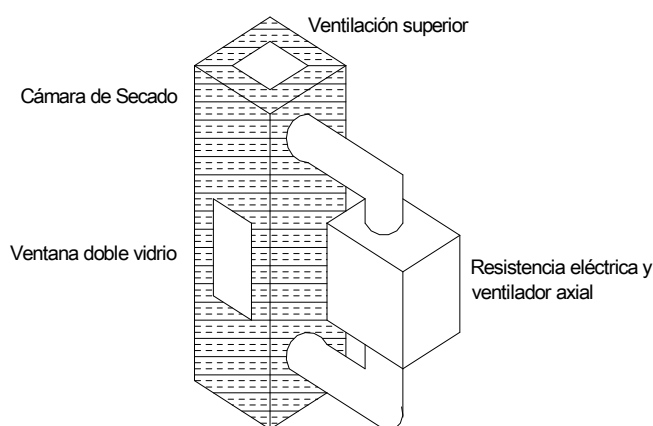


Figura 5 – Esquema del secador utilizado durante la experiencia.

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); el tiempo de registro fue definido cada 10 minutos. Se incorporaron también sensores y adquisidores de humedad y temperatura inalámbricos (NOVUS).

El secador, a su vez, se hallaba conectado a una celda de carga, con el fin de monitorear la pérdida de peso de los productos durante su deshidratado. Debido a fallas de carácter técnica, esta medición pudo realizarse sólo para el secado de tabaco.

Se ensayó el curado de una carga 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.

RESULTADOS

La carga de tabaco fue secada en un período de 6 seis días, buscando cumplir con las etapas del curado fijadas para este tipo de producto, obteniéndose las secuencias de imágenes (Figura 6).

La hojas de tabaco ingresaron al secador con una tonalidad verdosa, manifestado en su valor inicial de H ($H_1 = 0,189492$). La evolución del color se mostró satisfactoria para este ensayo al lograr un tono final de gran proximidad al deseado, según especificaciones de calidad comercial. El monitoreo por imágenes, seguido del análisis y seguimiento de los valores de temperatura y humedad en el interior de la cámara de secado, permitió comprobar el cumplimiento de las cuatro etapas de curado: amarillamiento, fijación de color, secado de lámina y secado de nervadura (López Méndez, 2010) (Figura 8). El cambio total de matiz al finalizar el secado fue $\Delta H_1 = -0,059176$ (Figura 7).

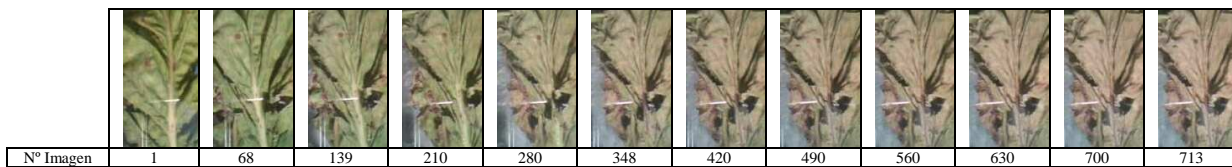


Figura 6 - Secuencia de imágenes obtenida de la primera carga de tabaco.

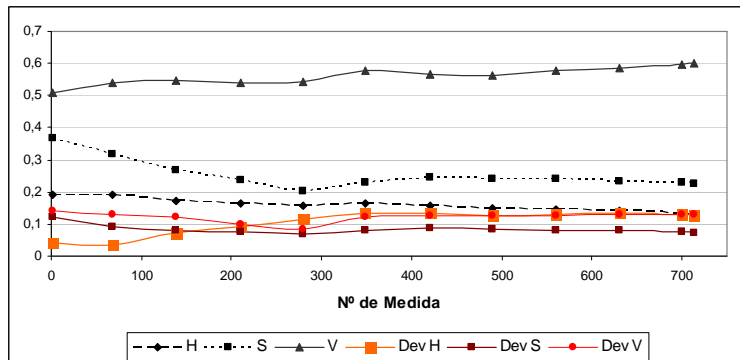


Figura 7 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes (izq.), así como de temperatura y humedad (der.) para la primera carga de tabaco.

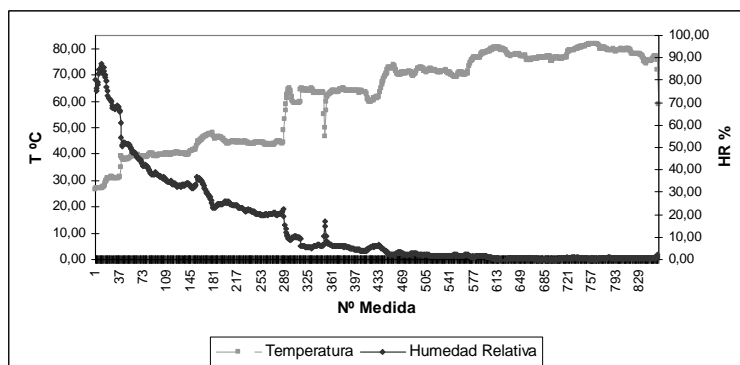


Figura 8 - Evolución de temperatura y humedad durante el secado de tabaco.

Otra de las variables analizadas, que contribuyen a caracterizar el proceso de secado es el peso (gr) de la carga (Figura 9). Para el caso bajo estudio, la curva resultante sigue la morfología típica de deshidratado de productos agrícolas. Luego estos valores fueron correlacionados con todos los canales resultantes del procesamiento de imágenes. El mejor ajuste fue obtenido con el ‘desvío estándar’ del canal H, con el cual la relación es inversa. Precisamente son estos valores los que brinda información sobre la textura de la imagen, explicando que a medida que las hojas se deshidratan, perdiendo peso, su textura aumenta.

De esta correlación pudieron identificarse claramente las etapas de curado del tabaco, donde en las primeras mediciones, lado derecho de la Figura 10, se produce el “amarillamiento” de las hojas sin intercambio de aire, en un ambiente saturado. Se observa que en esta etapa es poco el cambio de textura, como así también en la última etapa de secado donde la hoja alcanzó el aspecto final. En las etapas intermedias, luego del “amarillamiento”, se aumenta la ventilación con pérdida de peso de la carga, pasando por la “fijación de color” y el “secado de lámina”. Finalmente, hacia el final del proceso, la temperatura se eleva, mientras que el descenso de peso disminuye durante el “secado de vena” (Figura 10).

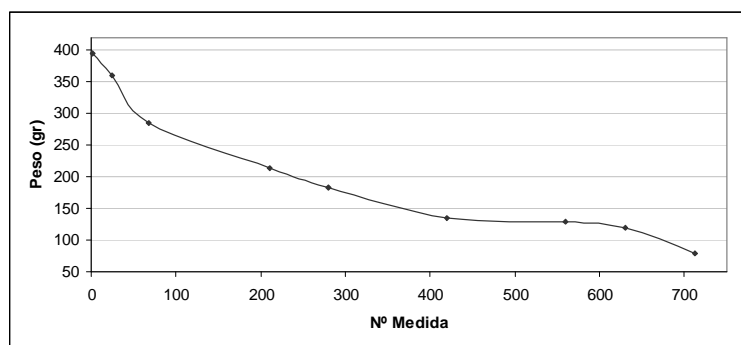


Figura 9 - Evolución de peso de la carga de tabaco a lo largo del secado.

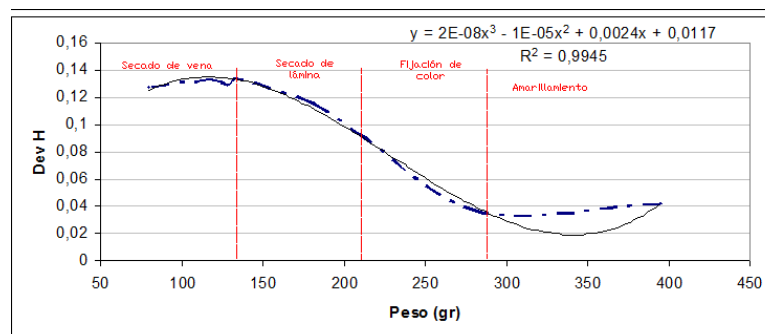


Figura 10 – Ajuste polinómico entre la variación de peso del tabaco y el desvío del canal H.

En lo que respecta a la desviación estándar del promedio de H, la misma crece de manera uniforme hasta la medida 400, luego de lo cual disminuye y se mantiene sin variaciones hasta el final del secado. El canal correspondiente al desvío estándar de H comprende la variable que mejor describe los cambios de textura de la imagen, en sentido lógico, su valor aumenta a medida que el producto se deshidrata. La variación total de textura fue de $\Delta \text{Dev H} = 0,085763$.

En referencia a los valores de temperatura, se logró reproducir la curva de curado practicada en estufas reales, con representación de los ascensos y mesetas característicos. La humedad relativa ambiente dentro del secador fue menor a la ideal ya que para la etapa de amarillamiento son requeridos valores de humedad próximos a la saturación. A pesar de esto, en la segunda etapa se consiguió un mejor ajuste con regulación de las mezclas de aire a través de la ventanilla superior del secador. (Figura 8 y Figura 10).

El cambio de peso experimentado por la carga de tabaco (394,81 – 79,68 gr.) fue correlacionado con los valores medios y desviaciones estándar de todos los canales resultantes del procesamiento de imágenes. El coeficiente de correlación más alto fue obtenido con el desvío del canal H, cuyos valores se elevan a medida que el tabaco pierde peso. De esta manera se confirma la bondad del empleo de este indicador para describir los cambios de textura de la imagen, referidos al proceso de deshidratado del producto. Asimismo a partir del análisis del gráfico de tipo polinómico resultante de correlacionar estas variables, pudieron ser definidas con claridad las cuatro etapas del curado de tabaco, dando idea de la potencialidad del sistema para caracterizar el curado de este producto (Figura 10).

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.

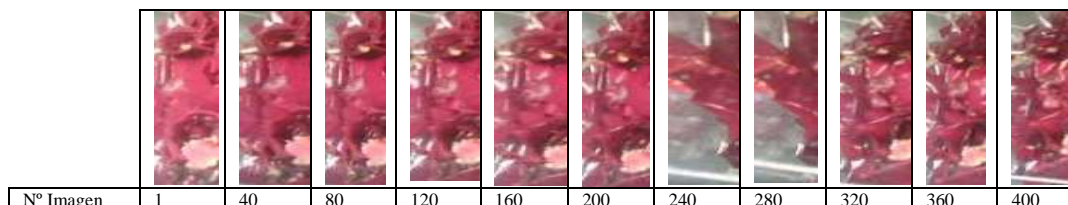


Figura 11 - Secuencia de imágenes obtenida de la primera carga de pimiento.

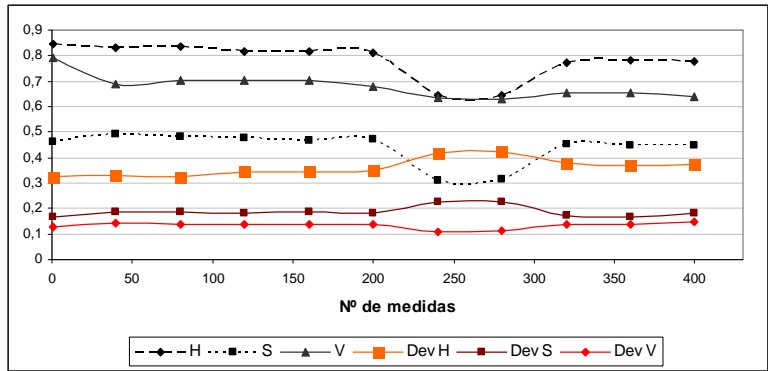


Figura 12 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la primera carga de pimienta.

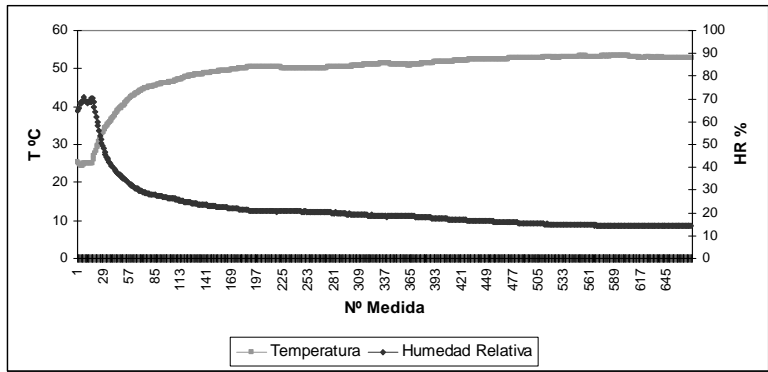


Figura 13 - Evolución de temperatura y humedad durante el secado de la primera carga de pimienta.

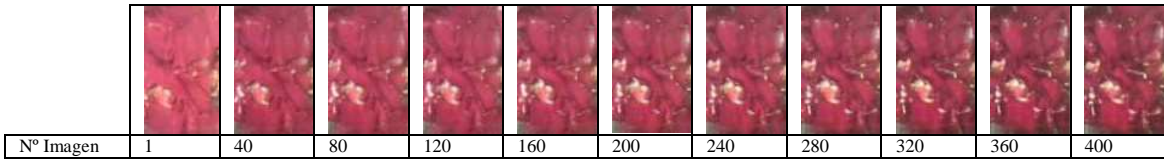


Figura 14 - Secuencia de imágenes obtenida de la segunda carga de pimienta.

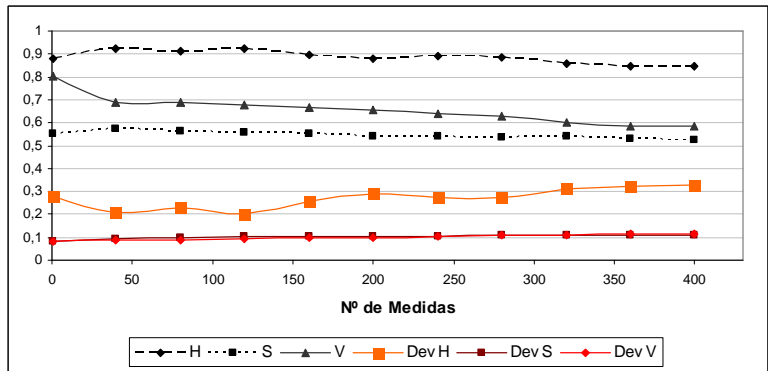


Figura 15 - Evolución de los valores de los canales H, S, V y de sus desvíos correspondientes, para la segunda carga de pimienta.

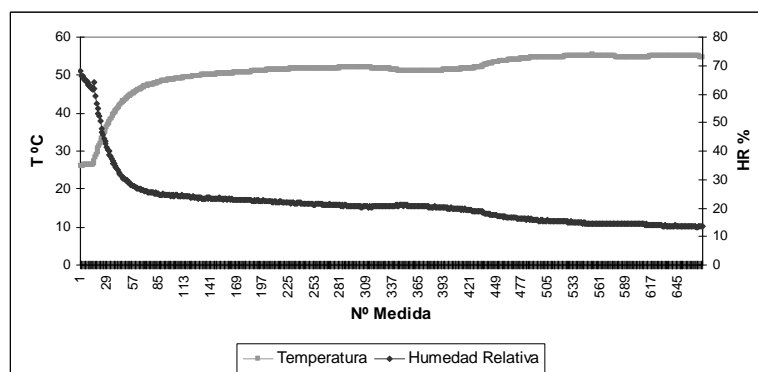


Figura 16 - Evolución de temperatura y humedad durante el secado de la segunda carga de pimienta.

El valor del matiz H inicial para la primera y segunda carga fue $H_1 = 0,844193$ y $H_2 = 0,882396$ respectivamente, mientras que la variación total después del secado fue $\Delta H_1 = -0,068916$ y $\Delta H_2 = -0,037431$. 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 (Figura 12 y Figura 15).

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 ($\Delta H_1 = -0,037431$; $\Delta S_1 = -0,028647$; $\Delta V_1 = -0,221642$) y ($\Delta H_2 = -0,068916$; $\Delta S_2 = -0,017125$; $\Delta V_2 = -0,151949$) 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 $\Delta \text{Dev } H_1 = 0,052859$ y $\Delta \text{Dev } H_2 = 0,049423$. 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 (Figura 12 y Figura 15).

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 (Figura 13 y Figura 16).

CONCLUSIONES

A partir de las experiencias puede determinarse que el valor promedio de H y su desviación estándar, medidos a partir del procesamiento de imágenes digitales aquí propuesto, constituyen buenos indicadores de la evolución del proceso de secado de productos agrícola. En particular el valor de H al inicio del secado brinda información relacionada al 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 (Figura 6 y Figura 7). Esto permitiría establecer un criterio para el tiempo de ‘ventilación’ del producto dentro de la estufa. Los valores obtenidos para las diferencias del valor del matiz H a través del tiempo permiten, a su vez, ponderar la ‘calidad’ del secado.

Para el curado ensayado del tabaco, la calidad del secado del mismo puede cuantificarse con el valor ΔH . El valor final de H para la hoja de tabaco curada debería encontrarse alrededor de 0,130316 que es el valor obtenido durante el secado experimentado calificado comercialmente como ‘satisfactorio’.

En referencia a la desviación estándar del valor de H como indicador de la textura, parece ser éste el mejor parámetro 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. A partir de los altos coeficientes de correlación con los valores de peso de la carga de tabaco, se confirma su utilidad para describir las variaciones de textura, asociadas al deshidratado de los productos. Por otro lado, la combinación de estas variables permite identificar y separar claramente cada una de las etapas que componen el proceso de curado del tabaco tipo Virginia. Comparando las gráficas de humedad relativa ambiente dentro del secador y la textura para el tabaco, se aprecia que los mencionados cambios de textura están directamente relacionados con los cambios de humedad relativa, pudiendo esto también ser asociado al proceso de secado (entre medidas 0 a 350 se observan las mayores variaciones de humedad relativa y también de la desviación del valor promedio de H).

Con respecto al pimienta, los ensayos muestran la sensibilidad del método para detectar variaciones de la intensidad del color, en este caso ‘rojo’, siendo el canal apropiado el del valor V (Figura 12 y Figura 15). 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 relación a las variaciones de textura relevadas para los dos ensayos de secado de pimiento, 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 empleado.

REFERENCIAS

- Belessioti, V., Delyannis, E. 2011. Solar Drying. *Solar Energy*, 85, 1665-1691.
- Durán, G., Condorí, M., Echazú, R., Díaz Russo, G. 2010. Secador solar híbrido para la producción continua a escala industrial de pimiento para pimentón. IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA). Cusco, Perú.
- 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.
- 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.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained from the developing of a sampling and digital image analysis system applied to the agricultural drying process monitoring. Since colorimetric aspects have great influence on the quality and end price of agricultural products, the potential of the system is associated with optimizing the process from the standpoint of the color achieved. Using the HSV color system, it was found that the average value of H and its standard deviation, measured from the digital image processing here proposed, are good indicators of the evolution of the drying process. With respect to pepper, tests show the sensitivity of the method for detecting variations in the intensity of color, in this case "red", where appropriate channel proves to be the V. In the case of tobacco, from the correlation between the weight evolution and the H deviation could be defined the four characteristic stages of the curing process. It can be highlighted the usefulness of the system in order to achieve automation and improve the energy efficiency of this process.

Keywords: digital images, drying, agricultural products.