

Procesamiento de imágenes ópticas de frutos café en cereza por medio de filtros acusto-ópticos

Julio César Mosquera M.*, Alberto Sepúlveda G.**,
César Augusto Isaza B.***

Resumen

En este trabajo, se presentan los resultados experimentales del análisis espectral de imágenes ópticas de muestras de frutos de café en cereza. El procesamiento espectral se realizó en el espectro visible de radiación electromagnética a través de un filtro acusto-óptico (FAO) fabricado con un cristal de dióxido de Telurio (TeO₂). La velocidad con la cual se obtienen las imágenes procesadas es superior a la de los métodos basados únicamente en técnicas DIP (Digital Imaging Processing), considerándose como un análisis en verdadero tiempo real. En particular, se muestra que este tipo de dispositivos representa una excelente alternativa en el procesamiento de imágenes para aplicaciones industriales de selección de granos de café según su estado de maduración y en conjunto con un menor procesamiento DIP.

Palabras claves: Acusto-óptica, apertura angular, selectividad, reflectividad, caracterización, espectral.

Abstract

This paper presents the experimental results of the spectral analysis of optical images of samples of cherry coffee fruits. The spectral processing was performed in the electro-magnetic radiation visible spectrum through an acoustic-optical filter (FAO) manufactured with a Tellurium Dioxide (TeO₂) crystal. The speed at

Fecha de recepción: 3 de mayo de 2007
Fecha de aceptación: 25 de junio de 2007

* Físico, M.Sc., Universidad Lomonosov de Moscú, Rusia. Pertenece al grupo de acusto-óptica del Instituto Interdisciplinario de las Ciencias y al programa de Tecnología en Electrónica, Universidad del Quindío. Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira. jucemos@utp.edu.co

** Ingeniero Eléctrico, Universidad Nacional Sede Manizales. Pertenece al grupo de acusto-óptica del Instituto Interdisciplinario de las Ciencias y al programa de Tecnología en Electrónica, Universidad del Quindío. asepulveda@uniquindio.edu.co

*** Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío. Pertenece al grupo de acusto-óptica del instituto Interdisciplinario de las Ciencias y al programa de Tecnología en Electrónica de la Universidad del Quindío. caisaza@uniquindio.edu.co Dirección: Universidad del Quindío, Instituto Interdisciplinario de las Ciencias – Programa de Tecnología en Electrónica.

Correspondencia: Cra 15, Cll 12 N. Armenia – Quindío.

which processed images are obtained is superior to those obtained with methods based on DIP (Digital Image Processing), and they are considered as an analysis in real time. Particularly it is shown that that this kind of devices represent an excellent alternative in the processing of images for industrial application in the selection of coffee grains according to their maturation stage and in general with a less DIP processing.

Palabras claves: Acoustic-optical, angle aperture, selectivity, reflectivity, characterization, spectral.

1. INTRODUCCIÓN

El café continúa siendo para Colombia uno de los principales renglones de la economía, hecho que se evidencia en las más de 600 mil familias que se dedican al cultivo y procesamiento del mismo [1]. Sin embargo, el gobierno y los gremios asociados a esta actividad reconocen que ahora, más que nunca, la competencia en los mercados internacionales estará demarcada por una diferenciación de producto y la puesta de un mayor valor agregado. La calidad del café depende, entre otras cosas, de la selectividad del cosechado que se realiza manualmente. Sin embargo, el aumento de productividad sólo es posible mediante la industrialización de los procesos y la garantía de una selección adecuada [2].

Se han realizado numerosos estudios, [3] – [6], con el objetivo de crear un sistema artificial de selección de granos según la etapa de maduración. Una parte muy importante involucra sistemas de visión artificial pero, aunque se han realizado propuestas muy creativas al respecto, el uso de algoritmos digitales para el procesamiento de la información ha hecho que estos sistemas no sean prácticos, tanto por costos, como por el tiempo y la eficiencia del procesamiento mismo de la información. Por otra parte, los métodos de procesamiento de señales a través de celdas acusto-ópticas han demostrado sus bondades en áreas donde precisamente se combinan eficiencia, rapidez de procesamiento y fiabilidad [7], [8]. En particular, los filtros acusto-ópticos (FAO) permiten realizar el análisis espectral de rayos luminosos portadores de imágenes en fracciones de 10^{-3} - 10^{-5} s, y con una alta resolución espectral [9], [10].

En este documento, se presentan los primeros resultados de la aplicación de estos métodos de análisis de imágenes para la conformación de un sistema de visión artificial que permita seleccionar granos de café según su estado de maduración.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

A. Filtro acusto – óptico (FAO)

El funcionamiento de un FAO se basa en la selectividad Bragg de la interacción de una onda electromagnética con una onda acústica aplicada en un cristal birrefringente [11]. Todo esto con el cumplimiento de las leyes de conservación de la energía y el momento, que pueden ser escritas así:

$$\begin{aligned}\omega_i \pm \Omega &= \omega_d \\ \vec{k}_i \pm \vec{K} &= \vec{k}_d\end{aligned}\quad (1)$$

Donde:

ω_i, k_i Frecuencia y vector de onda óptica incidente

ω_d, k_d Frecuencia y vector de onda óptica difractada

Ω, K Frecuencia y vector de onda de sonido.

Los parámetros del filtro quedan definidos mediante la geometría de interacción acusto-óptica, como se muestra en el diagrama de vectores de onda en la Figura 1 [11], [12]. En este estudio se utilizó un FAO en el que el vector de onda acústica está dirigido en un ángulo $\alpha = 8^\circ$ con respecto del eje [110] en el plano [1 $\bar{1}$ 0] de un cristal de dióxido de Telurio (TeO₂).

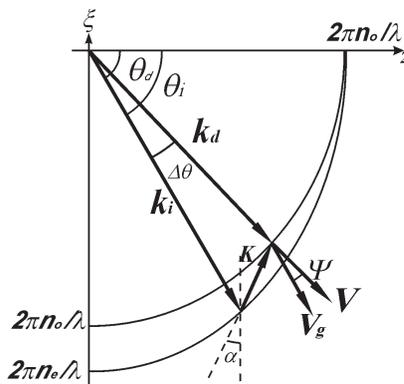


Figura 1. Diagrama vectorial k_i – radiación incidente, K – vector de onda acústica, k_d – radiación difractada. V – velocidad de fase de la luz, V_g – velocidad de grupo.

A partir del diagrama vectorial, se puede deducir la relación entre la frecuencia de ultrasonido entregada al cristal a través de un piezoconvertidor y el ángulo de incidencia de la luz para cada longitud de onda incidente [12]. Para el caso mostrado en la Figura 1, se obtienen las siguientes expresiones:

$$f = \frac{V}{\lambda} \left(n_i \sin \theta - \sqrt{n_0^2 - n_i^2 \cos^2 \theta} \right) \quad (2)$$

$$n_i = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_0^2 \sin^2(\theta_i + \alpha) + n_e^2 \cos^2(\theta_i + \alpha)}} \quad (3)$$

donde:

n_o, n_e Son los índices de refracción del cristal

Debido a la divergencia de la columna acústica formada en el cristal, la dirección de desplazamiento del vector de onda K no resulta exclusivamente en la dirección α , sino en un rango de ángulos $\alpha \pm \Delta\alpha$, lo cual conlleva a una disminución de la selectividad del filtro. Es decir, que para una frecuencia de ultrasonido f , el filtro permitirá el paso de una longitud de onda λ en un rango $\Delta\lambda$ que puede ser calculado al medir la efectividad de la difracción de cierta radiación monocromática. A partir de la ecuación (2), se puede obtener la siguiente expresión para la resolución espectral:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta f}{f} \lambda \quad (4)$$

B. Esquema de filtrado de las imágenes

Un esquema simplificado del experimento es presentado en la Figura 2, donde una imagen de los granos de café en cereza (I) es captada por una lente de alta resolución (L) y enfocada en el FAO. Entonces, una señal eléctrica, proveniente de un generador de radio frecuencias (RF), es entregada a un transductor piezo – eléctrico (TR), que genera una onda acústica sobre el cristal de TeO₂. La frecuencia entregada al transductor se encuentra en el rango de 70 MHz – 140 MHz. La selectividad de la interacción acusto – óptica hace que una fracción espectral de la imagen, correspondiente a cierta frecuencia RF, sea difractada (I_d) y captada por la cámara CCD conectada a un PC. De esta manera, la imagen captada no

requiere de ningún proceso digital de selección y los granos son separados según su contenido espectral.

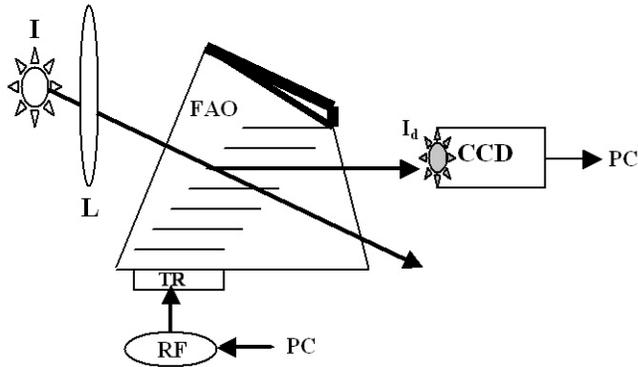


Figura 2. Esquema del experimento. I- Objeto, L-lente, FAO – Filtro acusto-óptico, I_d –Imagen filtrada, CCD – cámara conectada a un PC, TR- piezoconvertidor, RF – generador de RF.

Por otro lado, la imagen obtenida corresponde a una distribución 2D de la intensidad de luz reflejada por el objeto, es decir, es proporcional a la reflectividad del objeto en esa longitud de onda λ . Si se desea, es posible convertir cada píxel a una escala de niveles de intensidad y juzgar sobre la reflectividad del objeto.

Las fotos se pueden adquirir de manera sincronizada con el cambio de frecuencias entregadas por el generador RF que es controlado desde el PC. Así, el tiempo de procesamiento está determinado solamente por el tiempo de adquisición de la cámara CCD.

C. Desarrollo experimental

Primeramente, fue necesario conocer la resolución del FAO. Para esto se midió la respuesta en intensidad de luz difractada en función de la frecuencia RF para dos longitudes de onda de luz monocromática, provenientes de dos láseres de estado sólido con longitudes de onda de luz de $\lambda = 670 \text{ nm}$ y $\lambda = 540 \text{ nm}$, es decir, color rojo y verde. Para el caso del color rojo, los resultados se presentan en la figura 3. El ancho de la gráfica medida a nivel $\frac{1}{2}$ nos da un valor $\Delta f = 1,7 \text{ MHz}$ a una frecuencia central de $84,7 \text{ MHz}$. A partir de la ecuación (4), se encontró que el filtro

posee una resolución espectral $\Delta\lambda = 13 \text{ nm}$ para el color rojo, y $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ para el color verde. Seguidamente, se calculó la tabla de calibración, que permite colocar en correspondencia las longitudes de onda de la luz λ y las frecuencias f . De esta manera, se logró saber a qué longitud de onda corresponde cada imagen obtenida.

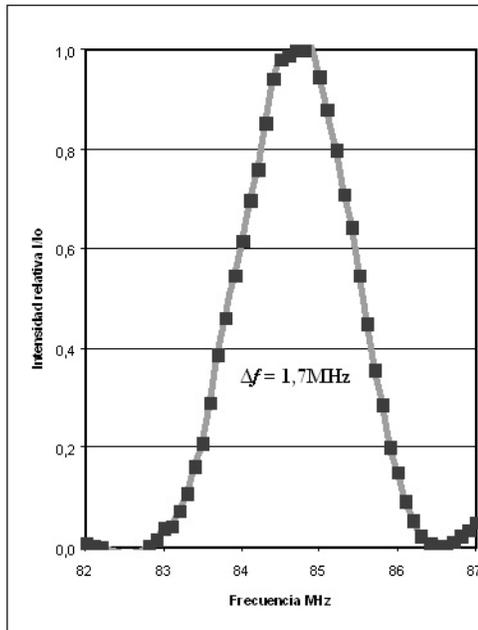


Figura 3. Respuesta en frecuencia del FAO, para $\lambda = 670 \text{ nm}$

También se realizó la caracterización de la función de transferencia del filtro, es decir, su eficiencia en difracción en dependencia del ángulo de incidencia, para una potencia de entrada RF de $\frac{1}{2} \text{ W}$. Aunque, a partir de esta medición, se puede esperar obtener un ángulo de visión de 16° , la separación de los rayos difractados de orden cero y +1 es de sólo 7° . En este caso, la resolución espectral del filtro resultó ser 320 líneas/cm .

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizó un análisis espectral de un racimo de café con frutos verdes y maduros (ver figura 4). Las medidas se realizaron en el exterior del laboratorio con una iluminación natural, a las 10 de la mañana.



Figura 4. Racimo con frutos de café verdes y rojos

Se obtuvieron 120 fotos diferentes, que corresponden a longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm. En la figura 5, se presentan dos imágenes diferentes tomadas al racimo de café para diferentes frecuencias del generador RF: $\lambda = 510$ nm y $\lambda = 620$ nm, respectivamente.

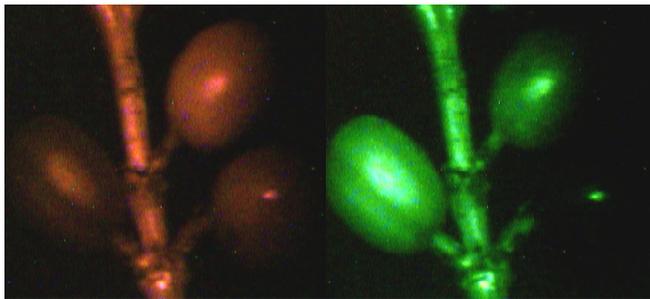


Figura 5. Fotografías tomadas a la salida del FAO de un racimo de café con frutos verdes y rojos iluminados con luz solar. Izquierda - $\lambda=510$ nm, derecha - $\lambda=620$ nm.

En las anteriores fotografías, es posible visualizar la separación que el FAO realizó entre los frutos verdes y los rojos. En cada caso, se resaltan los frutos correspondientes a una frecuencia en particular, mientras los otros se confunden con el color del fondo.

Aplicando una técnica DIP básica, como la eliminación del fondo, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 6.

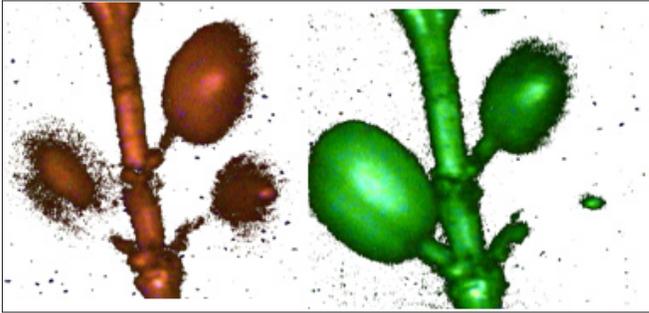


Figura 6. Eliminación digital del fondo de las fotos de la figura 5.

En una segunda etapa, se practicó un análisis espectral, en laboratorio, de un racimo de frutos de café iluminados con una lámpara incandescente de 30 W. En este caso, se tomaron más de 200 fotos a diferentes frecuencias RF, que corresponden a un rango de longitudes de onda de la luz desde el cercano infrarrojo ($\lambda = 800$ nm) hasta el violeta. Los resultados son apreciables en la Figura 7. En esta situación, la diferencia entre frutos verdes y maduros es mucho más evidente para longitudes de onda correspondientes al color verde. Nuestras mediciones mostraron un pico de intensidad para $\lambda = 530$ nm.

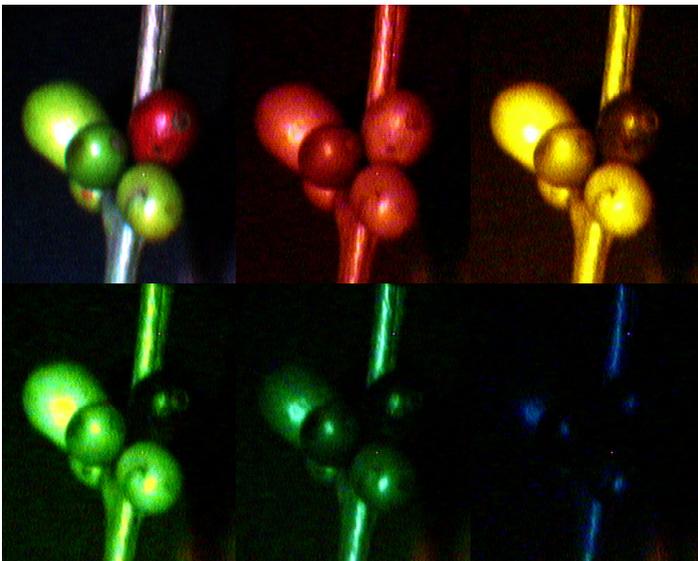


Figura 7. Análisis espectral de granos de café en cereza con iluminación artificial, para diferentes longitudes de onda, desde el cercano infrarrojo hasta el violeta.

En cambio, para longitudes de onda correspondientes al color rojo ($\lambda = 630 \text{ nm}$), los frutos verdes presentan una reflectividad tal que la diferenciación entre frutos verdes y maduros no es suficientemente apreciable. Sin embargo, es de resaltar que para longitudes de onda correspondientes al color amarillo, esta separación de los frutos verdes y maduros es más evidente, lo cual puede deberse al tipo de iluminación usada.

Algunos frutos muestran una reflectividad alta a diferentes longitudes de onda, de tal manera que, para ciertas longitudes de onda, la separación por color no es muy buena. Sin embargo, en sistemas de visión artificial, las imágenes obtenidas del FAO pueden ser capturadas en niveles de gris y ayudados con técnicas DIP para el procesado final.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se muestra que los FAO ópticos son una excelente opción para la implementación de sistemas de visión artificial. De manera concreta, se demuestra que con la selección de un rango de frecuencias se pueden seleccionar granos de café en sus diferentes etapas de maduración.

Se plantea, entonces, la realización de experimentos que conlleven a implementar sistemas autónomos de selección de café permitiendo la industrialización de tales tareas. Los tiempos de procesamiento son muy inferiores a los tiempos utilizados en técnicas DIP, debido a que las imágenes adquiridas del FAO ya se encuentran pre-procesadas. Además, el sistema es compacto y portátil y permite realizar los análisis con iluminación natural, lo que puede ser utilizado para la predicción de los niveles de cosecha. Se espera complementar este trabajo con estudios que involucren el análisis del estado de polarización de las imágenes adquiridas, así como el estudio de las hojas de las plantaciones con el fin de certificar el no uso de plaguicidas en los cultivos de café.

Referencias

- [1] Capital humano, [En línea]. Disponible en www.bancomundial.org/cuarto/foro/text/c-presentacion-CapitalHumano.
- [2] Z. Sandoval, F. Prieto, Caracterización y clasificación de café cereza por medio de visión artificial, 2003.
- [3] CENICAFE. *Beneficio Ecológico del Café*. Chinchiná: Cenicafé, Centro Nacional de Investigaciones de Café, 1999.
- [4] J. E. Hernandez, *Clasificación de frutos de café según su etapa de maduración basada en redes neuronales artificiales*. Manizales: U. Nacional de Manizales, 2004.

- [5] J. Betancur, *Segmentación de granos de café mediante métodos de crecimiento de regiones*. Manizales: U Nacional de Manizales, 2002
- [6] C. Maya. *Desarrollo de un algoritmo para la caracterización y clasificación de granos de café empleando técnicas de visión artificial*. Manizales: U. Nacional de Manizales, 2001.
- [7] N. Gupta & others, "Objet detection with a field-portable spectropolarimetric imager". *Applied Optics*, Vol. 40, N° 36, pp. 6626 – 6632, Dec 2001.
- [8] V. Voloshinov, V. Molchanov, J. C. Mosquera, "Spectral and Polarization analysis of Optical Images by means of Acousto - optics", *Optics and Laser Technology*, Vol. 28, N° 2, pp. 119 – 127, 1996.
- [9] V. Balakshy, V. Paryguin, L. Chirkov, "Physical Principles of Acousto-optics", *Radio & Communications*, Moscow, 1985.
- [10] L. Magdish, V. Molchanov, "Acousto-optical devices and Their applications", Nueva York: Gordon and Breach, 1988.
- [11] V. Voloshinov, J.C. Mosquera, "Wide angular acousto-optical interaction in Birefringent Crystals", *Optics & Spectroscopy* Vol. 101, N° 4, pp. 677 – 684, August 2006.
- [12] J. C. Mosquera y otros, "Análisis de imágenes por Métodos Acusto-Ópticos en el espectro visible y cercano IR", *Memorias XI simposio de tratamiento de Señales, imágenes y visión artificial, STSIVA*, 2006.