

ALGORITMO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CAFÉ LAVADO AFECTADO POR LA BROCA DEL CAFÉ

Juan Mateo Castrillón Cuervo*; Juan Rodrigo Sanz Uribe**; Paula Jimena Ramos Giraldo**

CASTRILLÓN C., J. M.; SANZ U., J. R.; RAMOS G., P. J. Algoritmo para la identificación de café lavado afectado por la broca del café. *Revista Cenicafé* 68(2):7-19. 2017

Esta investigación tuvo como propósito utilizar técnicas de visión artificial para identificar los granos de café afectados mediana y ligeramente por la broca del café, en el estado de café lavado. Esta técnica puede usarse para la clasificación de café en una máquina electrónica. Esto permitirá realizar la clasificación del café y posiblemente mejorar los ingresos de los caficultores, a través del incremento del precio de venta de café o incursionar en el mercado de cafés especiales. Se hicieron pruebas con un escáner y se implementó un sistema de visión artificial conformado por una cámara industrial de alta velocidad y un sistema de iluminación controlado, diseñado con requerimientos específicos, con el que se tomaron imágenes a 500 granos de café lavado en estados sano y brocado. Posteriormente, se desarrolló un algoritmo que consistió en segmentar los granos de café lavado e identificar las posibles perforaciones de broca y deterioro, recorriendo las imágenes con una máscara de dimensiones variables, para identificar las características de la afectación causada por el insecto. Se encontró que con una máscara de 3x3 píxeles, en imágenes con una resolución de 33,5 píxeles/cm (ppcm), se identifican los granos de café lavado afectado por la broca del café con el menor costo computacional y una eficacia promedio de identificación superior al 90%, el cual fue el criterio mínimo de aceptación. Este hallazgo permite concluir que es técnicamente viable la construcción de una máquina basada en visión artificial para la clasificación de café afectado por la broca del café.

Palabras clave: Visión artificial, clasificación, *Hypothenemus hampei*, imagen digital, calidad.

ALGORITHM FOR THE IDENTIFICATION OF WASHED COFFEE AFFECTED BY COFFEE BERRY BORER

The purpose of this research project was to use machine vision techniques to identify washed coffee beans moderately and slightly affected by coffee berry borer. This technique can be used to sort coffee in an electronic machine and, probably, to rise the income of the farmers by increasing the retail price of coffee or by getting into the specialty coffees market. A scanner was used to make tests and an artificial vision system was made up by using a high-speed industrial camera and a controlled lighting system, designed with specific requirements, that was used to take images of 500 washed coffee beans, both healthy and damaged by coffee berry borer. Subsequently, an algorithm to segment washed coffee beans and to identify potential borings or deterioration was developed by going through the images with a mask of variable dimensions in order to identify the characteristics of the damage caused by the insect. Washed coffee beans affected by coffee berry borer are identified with a 3x3 pixel mask in images with a resolution of 33.5 pixels/cm (ppcm) with the lowest computational cost and an average identification efficiency of over 90%, which was the minimum acceptance criterion. This finding leads to the conclusion that the construction of an artificial vision-based machine for the sorting of coffee affected by coffee berry borer is technically feasible.

Keywords: Artificial vision, *Hypothenemus hampei*, digital image, quality.

* Asistente de Investigación, Disciplina de Ingeniería Agrícola, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Investigador Científico III e Investigador Científico I, respectivamente, Disciplina de Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

La calidad del café colombiano se debe al control riguroso en el cultivo y en los procesos de cosecha y poscosecha. Uno de los principales enemigos de la calidad es la broca del café (*Hypothenemus hampei*), un insecto que ingresó a nuestro país a finales del siglo pasado, el cual es causante de grandes pérdidas económicas en la caficultura colombiana. Las infestaciones del insecto son más severas durante el evento de El Niño, el cual es consecuencia del calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial (8), que se manifiesta con sequías prolongadas en la mayoría de las zonas cafeteras de Colombia.

En el mundo se estima que la broca causa pérdidas anuales de más de 500 millones de dólares (5, 6), debido al detrimento de calidad física y organoléptica del café, y su efecto directo en el precio de venta. Los frutos infestados presentes en el suelo o en el árbol causan aumento en las poblaciones del insecto, lo cual requiere establecer un manejo de la broca en el campo para mantener los niveles de infestación en valores controlables (3). Las tazas de café con altos porcentajes de granos dañados por insectos poseen un olor nauseabundo, acidez acre o nula, amargor muy fuerte, cuerpo pesado y sabores a contaminado o carbonoso que la hacen imbebible (1).

Hay diferentes sistemas para la clasificación del café, que a su vez sirven para la remoción de café afectado por la broca. Dentro de estos sistemas se destaca el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín (SHTTS), capaz de separar material liviano (97,7%) e impurezas pesadas y duras del café en cereza (88,2%) por densidad (11). Otro sistema que realiza

un trabajo muy similar al SHTTS es el tanque sifón, pero con mayor consumo específico de agua (10). Adicionalmente, existen los sistemas para la clasificación por densidad del café lavado, como son el canal de correteo (14, 17, 18), el canal semi-sumergido¹, el hidrociclón (1), entre otros, en los cuales se separan fácilmente granos de café afectados severamente por la broca. No obstante, los granos de café mediana y ligeramente afectados por la broca, daño conocido como punto de broca, son difíciles de remover, dado que la densidad de ellos es muy similar a la de los granos sanos².

La implementación de visión por computador ha optimizado procesos de selección, entre los que cabe destacar el diseño y la construcción de la máquina seleccionadora de frutos de café cereza por color, la cual clasifica los frutos de café en cinco estados de maduración, con una eficacia de clasificación superior al 95%, a una capacidad de 50 frutos/s, equivalente a la capacidad de una despulpadora de 300 kg.h⁻¹ (13, 16). En el mercado actual se encuentran numerosas máquinas clasificadoras basadas en visión artificial, las cuales realizan controles de calidad en productos alimenticios como cereales, semillas y granos, incluyendo los de café trillado, ampliamente utilizadas en las trilladoras de café (2).

En Colombia, las trilladoras se valen de diferentes sistemas para clasificar café trillado, utilizando combinaciones en serie y paralelo, de diferentes máquinas de clasificación densimétrica y electrónica: mesas densimétricas, catadoras neumáticas y las clasificadoras electrónicas. En observaciones de la masa de entrada y salida para dos

¹MÁRQUEZ G., S.M. Canal semisumergido para la clasificación del café cereza y pergamino húmedo: Informe. Chinchiná : Cenicafé, 1988. 32 p.

²CASTRILLÓN C., J.M.; RÍOS G., J.A. Informe visita trilladora Almacafé Manizales: Máquinas selectoras de café almendra. Manizales : Cenicafé, 2015.

máquinas electrónicas diferentes, la mayor eficacia encontrada para separar granos con puntos de broca fue del 70% y para granos brocados se encontraron eficacias que variaban entre el 25% y 44%. Se observó que aparte de todas las clasificaciones hechas a los granos en máquinas, que han seguido procesos rigurosos de calibración, al final del proceso es necesario hacer una separación manual en una banda transportadora (Figura 1), para cumplir con los estándares de calidad establecidos para la exportación del café. Todos los procesos mencionados anteriormente se traducen en un alto costo de mano de obra y de energía eléctrica.

En pruebas realizadas en los procesos de remoción del mucílago de café, se observó que los granos con endospermo (almendra) defectuoso pueden ser fácilmente observables cuando el café está en estado lavado, porque

el endocarpio (pergamino) es translúcido y se encuentra adherido al endospermo. Es más, como el grano está con su máxima humedad, el endospermo también tiene un grado de translucidez que permite apreciar características internas. De esa manera, un grano con afectación mediana o ligera de la broca del café, el cual no es separado por densidad en alguna de las etapas del beneficio húmedo del café, presenta características que son fácilmente observables a simple vista o a través del procesamiento de imágenes digitales. Las características apreciables de los granos brocados mediana y ligeramente, que los diferencia de los granos sanos, son un agujero de 1,13 mm de diámetro en promedio³, el cual normalmente se encuentra en la cara plana del grano (4), y las cavernas perforadas por el insecto en el endospermo, que por el deterioro se tornan oscuras.

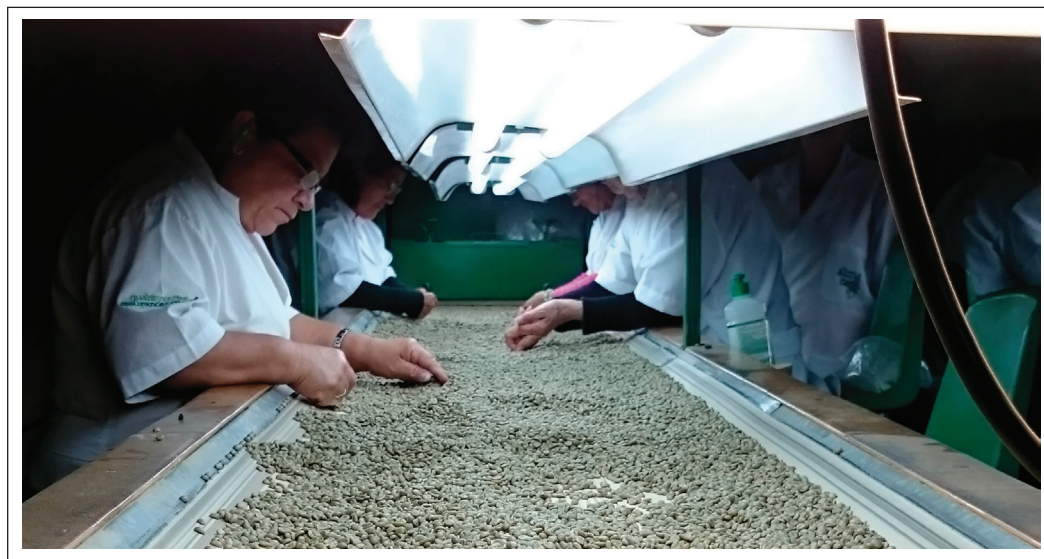


Figura 1. Clasificación manual del café almendra al final de los procesos industriales de clasificación automáticos en la trilladora.

³ SANZ U., J.R. Visión artificial para la clasificación automática de café pergamino húmedo: Primer informe parcial. Bogotá : Colciencias, 2014.

Este trabajo de investigación tuvo como propósito utilizar técnicas de visión artificial para identificar eficazmente los granos de café afectados mediana y ligeramente por la broca del café, en el estado de café lavado. Esta información puede ser utilizada para el desarrollo de una máquina para remover los granos con este defecto, con el fin de ayudarlo al caficultor a ofrecer un café con mejor calidad, lo cual se traduce en un mayor precio de venta. Así mismo, se pretende ayudar a las industrias trilladoras regionales para obtener una mejor materia prima, evitar procesos y reducir los costos de mano de obra y energía eléctrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue llevada a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Visión Artificial de la Disciplina de Poscosecha en Cenicafé.

La metodología de investigación se realizó en tres fases: 1) Adquisición de las imágenes, 2) Caracterización y análisis de los defectos causados por la broca del café, y 3) Desarrollo de los algoritmos de segmentación e identificación.

El café lavado utilizado provenía de la Estación Experimental Naranjal, de plantaciones con Variedad Castillo[®], el cual fue procesado por fermentación natural y lavado manual o mecánico. El café se trabajó siempre con menos de dos horas de haber realizado la remoción del mucílago, el cual después de escurrido presentaba una humedad media de 53% base húmeda.

Fase I. Adquisición de las imágenes

La adquisición de las imágenes fue hecha en formato TIFF (*Tagged Image File Format*)

sin compresión de datos, a través de un escáner CanonScan[®] 5600F a una resolución de 116,9 ppcm¹ y una cámara HS 2000C de la marca Emergent[®] Vision Technologies con una resolución de 83,8 ppcm.

Se diseñó y construyó un sistema de iluminación controlada, para adquirir imágenes con la cámara Emergent[®] Vision dentro de una campana de inspección de 0,15 m³. La iluminación estuvo conformada por cintas LEDs (*Light Emitting Diodes*) de 24 W de bajo requerimiento energético y generación de calor despreciable, la cual ayuda a mantener la humedad en los granos durante la inspección. Se seleccionaron estos LEDs con esa potencia, porque dispuestos adecuadamente iluminan de manera homogénea y uniforme, con poca incidencia de sombras y brillos indeseados. En el fondo de la campana se dispuso un elemento de contraste azul cian con componentes *Red*: 0, *Green*: 116 y *Blue*: 238 (referencia comercial LG-SCO 2067). Sanz *et al.* (15) verificaron que dicho elemento de contraste segmenta la totalidad de los defectos apreciables en este estado. En la Figura 2 puede observarse dicho montaje experimental.

Fase II. Caracterización y análisis de los defectos

El análisis se realizó con las herramientas computacionales Scilab, C++ y su librería, para el procesamiento de imágenes OpenCV, de código abierto y libre distribución.

Para la caracterización se dispusieron simultáneamente 80 granos sanos y 80 granos brocados en el escáner, el cual se adaptó con el contraste de fondo descrito en la Fase I. Mediante la biblioteca OpenCV

¹ ppcm: Píxeles por centímetro. Unidad del sistema internacional para denotar la densidad de píxeles de una imagen digital.

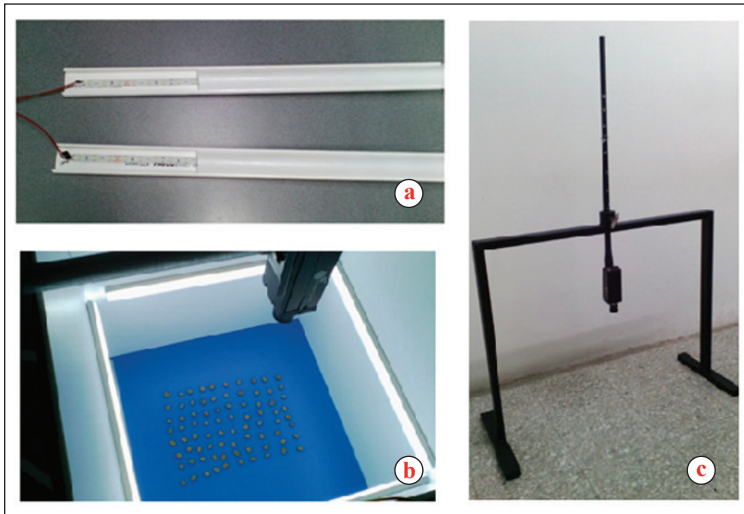


Figura 2. Sistema utilizado para la adquisición de las imágenes, **a.** Iluminación tipo LED; **b.** Campana de inspección con fondo de contraste; **c.** Cámara industrial de alta velocidad HS 2000C con bastidor de soporte.

para C++ y su visualizador Qt-Creator se observaron las intensidades en RGB de los granos sanos y los granos brocados, tanto en pequeñas perforaciones como en áreas con deterioro avanzado.

También se analizaron otros aspectos morfológicos de los granos como el tamaño de los orificios donde la broca penetra los granos, coloraciones de las hendiduras y otras imperfecciones de los granos que tienen un alto potencial de diferenciación para su implementación en este algoritmo.

Se determinó la consistencia del tamaño del orificio de la broca, a través de la desviación estándar del número de píxeles que representa dicha perforación sobre los granos de café brocados.

Fase III. Desarrollo de los algoritmos de segmentación e identificación

Los algoritmos fueron desarrollados en Scilab, con las librerías de procesamiento de imágenes IPD y SIVP.

Para el algoritmo de segmentación se utilizó la representación del color YCbCr, la Ecuación <1> muestra la conversión del espacio de color RGB a YCbCr (8, 9).

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65,48 & 128,55 & 24,96 \\ -37,79 & -74,20 & 112 \\ 112 & -93,78 & -18,21 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad <1>$$

Las componentes *Cb* y *Cr* representan componentes de crominancia azul y roja, respectivamente. Los granos de café poseen intensidades azules bajas, lo cual facilita la segmentación de éstos sobre un fondo o contraste de coloración azul. En la Figura 3 se muestra un histograma de la componente *Cb*, con dos picos máximos, un máximo global correspondiente a la información de píxeles de fondo y un máximo local correspondiente a la información de granos de café brocado y sanos.

En la Tabla 1 se aprecia el algoritmo para segmentar los granos de café. Dicho algoritmo no se ve afectado por los brillos que produce el agua y elimina las pequeñas

impurezas de la imagen, dejando solamente los granos como región de interés, como se observa en la Figura 4.

Tabla 1. Algoritmo para segmentar café pergamino húmedo.

Paso	Descripción
1	Obtener la imagen digital
2	Almacenar las componentes RGB en memoria
3	Convertir al espacio de color YCbCr
4	Establecer el punto de umbralización mediante umbral adaptativo Otsu (12)
5	Obtener la matriz binaria
6	Etiquetar los objetos en la imagen
7	Eliminar los objetos pequeños (errores de umbralización)

Para la identificación de las perforaciones de la broca se desplazó una máscara cuadrada de $N \times N$ a través de la imagen, siendo N el tamaño de la matriz a desplazar. Cuando el promedio de todos los elementos de dicha máscara es inferior al umbral T , dicha región es clasificada como un grano afectado por la broca. El umbral T y el tamaño N son determinados de acuerdo a los resultados de la Fase II. En la Tabla 2 puede observarse el algoritmo con mayor detalle.

Tabla 2. Algoritmo para la detección de broca.

Paso	Descripción
1	Calcular la matriz de la escala de grises
2	Multiplicar punto a punto la imagen en escala de grises por la matriz binaria
3	Iterar la máscara de $N \times N$ a través de la matriz resultante del Paso 2
4	En cada iteración calcular el promedio de los píxeles contenidos en la máscara
5	Si el promedio es menor al umbral de necrosis clasificar dicha región como un grano brocado

Calibración del algoritmo. Se calibraron los siguientes parámetros del algoritmo:

- Píxeles por centímetro de la imagen, ppcm (tamaño de la imagen)
- Tamaño de la máscara, $N \times N$ en píxeles
- Umbral de necrosis, T , en píxeles

Se calculó la eficacia del algoritmo para diferentes parámetros de calibración, densidad de píxeles entre 16,8 y 116,9 ppcm, N entre 3 y 11 píxeles, y T entre 60 y 140 píxeles.

Dichos parámetros fueron ajustados con el fin de obtener la mayor eficacia posible con el menor número de puntos por centímetro, y así encontrar la imagen más pequeña posible que permita implementar un algoritmo rápido y confiable. También se registró el tiempo de cómputo por cada grano.

Para llevar a cabo la calibración, inicialmente se encontró la imagen de menor tamaño (menor número de píxeles por centímetro), con la cual se mantenía una eficacia de al menos 90%, posteriormente, se ajustaron los dos parámetros restantes para incrementar dicho valor.

A partir de un análisis de matriz de confusión o tabla de contingencia (10), se calculó la eficacia de identificación (Ecuación <2>).

$$E = \frac{N_{ss} + N_{bb}}{N} \quad \langle 2 \rangle$$

Donde:

E = Eficacia

N_{ss} = Número de granos sanos identificados como sanos

N_{bb} = Número de granos brocados identificados como brocados

N = Número total de granos analizados

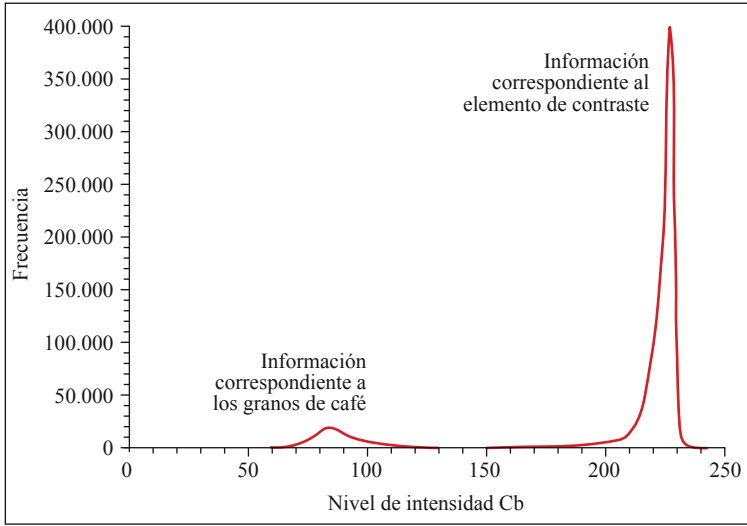


Figura 3. Histograma de intensidades para granos sanos y brocados.

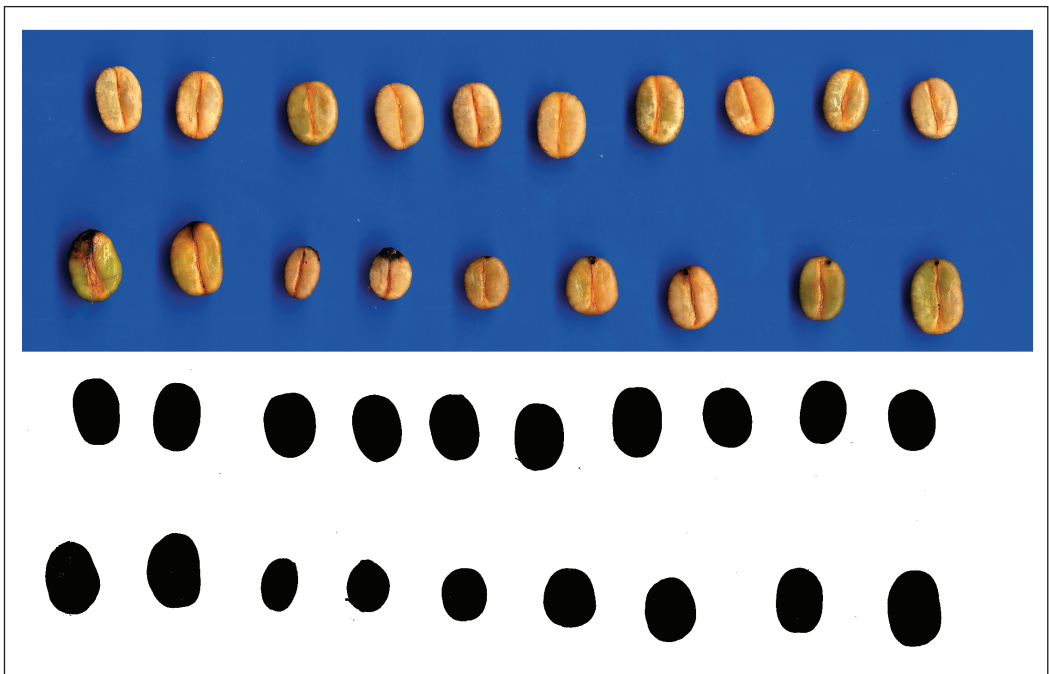


Figura 4. Umbralización granos brocados y sanos. Imagen original arriba e imagen umbralizada abajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo de segmentación logró identificar el 100% de los granos brocados y el 100% de los granos sanos. El umbral adaptativo Otsu, de bajo costo computacional, permitió tener un algoritmo de segmentación robusto, con una incidencia baja ante los cambios de iluminación, efectos de sombras y reflejos de luz producidos por el agua.

En la Figura 5 puede observarse un caso típico de perforación de la broca en el grano de café, imagen obtenida con el escáner sin algún tipo de modificación. Puede observarse que el diámetro aproximado es de nueve píxeles y los niveles de intensidad en los tres canales RGB son muy bajos (oscuros).

A través de método de píxeles calibrados, se corroboró que en promedio el tamaño del daño de broca es de aproximadamente 1,13 mm de diámetro en las perforaciones de los granos, con una desviación estándar de 0,12 mm, lo que evidencia una alta

consistencia en el tamaño de las perforaciones y facilita la implementación del algoritmo con un tamaño de máscara fija que recorra la imagen en busca de puntos con bajos niveles de intensidad.

Calibración del algoritmo. Para las imágenes de granos adquiridas con el escáner se obtuvieron eficacias de identificación que variaron entre el 50,00% y 93,12%. En la Figura 6, utilizando un umbral de la máscara de 100, se observa claramente que las eficacias superiores al 80,00% se obtienen con imágenes de un tamaño entre 60 y 80 ppcm y una máscara con un tamaño N de 11×11 ó 9×9 ; sin embargo, se busca un algoritmo rápido y con estas resoluciones se experimentaron tiempos de ejecución superiores a los 20 s por cada escena (Figura 7).

El tamaño de máscara de 3×3 , aplicado a una imagen con 23,4 ppcm, posee una eficacia del 89,37%; mientras que para las imágenes a 46,8 ppcm se tienen eficacias del 90,62% y 88,12%, para máscaras de tamaño

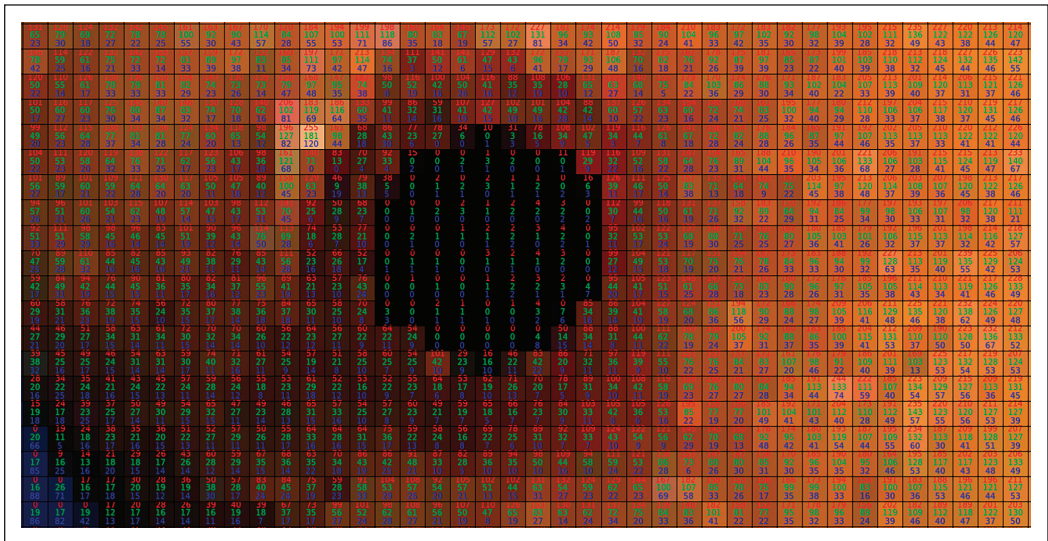


Figura 5. Perforación típica de *H. hampei* y sus niveles de intensidad RGB.

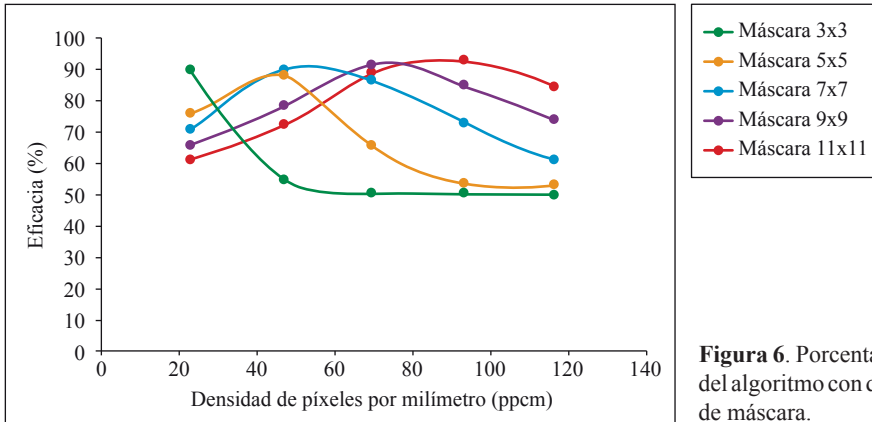


Figura 6. Porcentaje de las eficacias del algoritmo con diferentes tamaños de máscara.

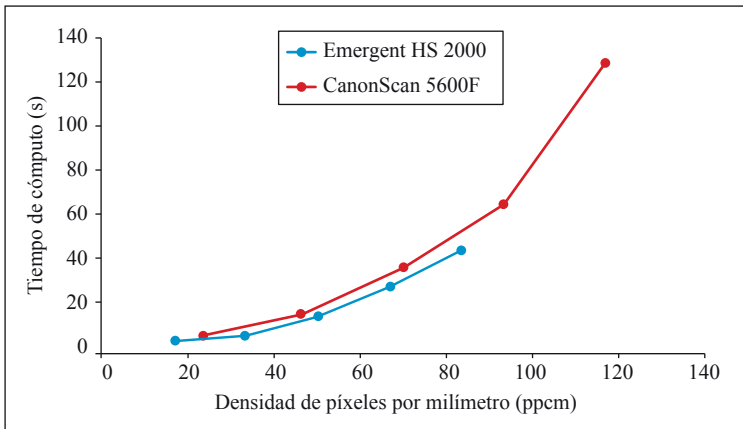


Figura 7. Tiempo de cómputo promedio empleado por el algoritmo según la resolución de la imagen.

7x7 y 5x5, respectivamente. Por lo que se seleccionan dichas densidades de píxeles para continuar la calibración.

Para una resolución de 46,8 ppcm y un umbral T de 60, se obtuvo una eficacia del 95%. Del mismo modo se realizaron más pruebas del algoritmo, en la Tabla 3 se presentan las eficacias más altas y sus parámetros de operación; se aprecia que las mayores eficacias se obtuvieron con imágenes a 46,8 ppcm. Al variar los demás parámetros de calibración con imágenes a 23,4 ppcm no se encontraron eficacias mayores

al 80%, excepto la que se incluyen en la Tabla 3. En la Figura 8 puede apreciarse el reconocimiento de granos brocados mediante el algoritmo en el punto de trabajo óptimo encontrado (parámetros en la primera fila de la Tabla 3).

Análogamente, se realizó el mismo proceso de calibración para las imágenes adquiridas mediante la cámara Emergent HS 2000C. Las eficacias obtenidas, el tiempo de cómputo empleado para cada reconocimiento y los parámetros con que estos datos fueron obtenidos se presentan en la Tabla 4. Solo

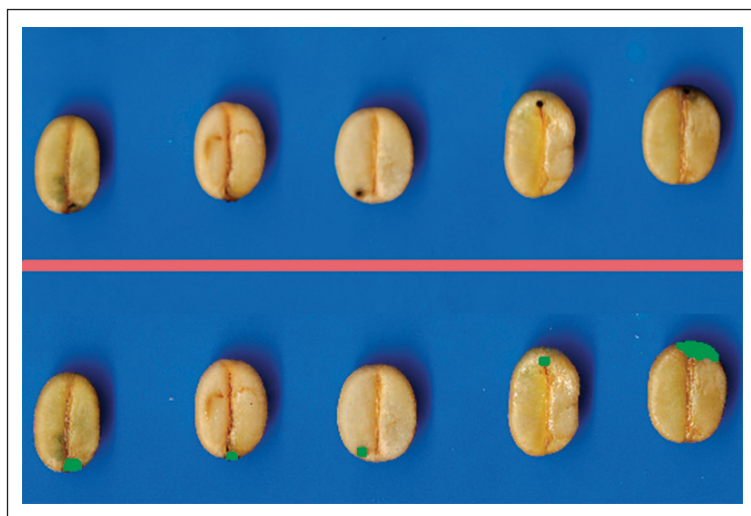


Figura 8. Reconocimiento de granos perforados por la broca del café y zonas con deterioro.

Tabla 3. Eficacias y sus parámetros de operación para imágenes adquiridas con el CanonSacn 5600F.

Eficacia (%)	Densidad (ppcm)	Tamaño de máscara (píxeles x píxeles)	Umbral (Intensidad)	Tiempo de ejecución (s)
95	46,8	3x3	60	16,79
91	46,8	5x5	80	16,56
91	46,8	5x5	100	16,81
91	46,8	9x9	120	16,47
91	46,8	7x7	100	16,48
89	23,4	3x3	100	7,87

Tabla 4. Eficacias y parámetros de operación para imágenes adquiridas con la cámara Emergent HS 2000C.

Eficacia (%)	Densidad (ppcm)	Tamaño de máscara (píxeles x píxeles)	Umbral (Intensidad)	Tiempo de ejecución (s)
91	33,5	3x3	80	7,75
91	50,3	3x3	80	16,60
89	33,5	5x5	100	7,47
89	50,3	7x7	100	16,40

se muestran valores de 33,5 y 50,3 ppcm, debido a que las eficacias obtenidas a menor resolución no superaron el 70%.

Para ambos casos de adquisición, ninguna de las eficacias alcanzó el 100%, debido a que existen algunos granos de café brocado que no presentan perforaciones visibles por su cara plana. Se encontraron granos con perforaciones en la cara convexa (menos del 1%) y en una menor proporción granos cuyas perforaciones eran solamente visibles al tener el grano sostenido verticalmente y observar el costado de sus extremos (Figura 9).

Las eficacias más altas para ambos métodos de adquisición fueron resultado del trabajo con imágenes de gran tamaño; sin embargo, el tiempo de cómputo supera los 20 s, debido al elevado número de iteraciones que deben realizarse para recorrer la imagen. Los parámetros hallados permiten diferenciar entre granos brocados y sanos a una velocidad de 25 granos/s con una eficacia del 91%, para el caso de las imágenes procedentes de la cámara industrial.

Posteriormente, se realizaron ensayos con 800 granos brocados y 800 granos sanos para corroborar los datos obtenidos y confirmar

el punto óptimo de trabajo de la cámara. Las eficacias se mantuvieron superiores al 91% para todos los casos y los tiempos de cómputo fueron similares; sin embargo, los tiempos de cómputo observados fueron altos, debido a que esta parte de la investigación se llevó a cabo mediante un lenguaje de programación de alto nivel, para facilitar el diseño y desarrollo del algoritmo. Estos tiempos se están reduciendo a través de la implementación de un sistema autónomo con otro lenguaje de programación, haciendo uso eficiente de memoria y aprovechando al máximo los recursos del dispositivo, donde se han encontrado tiempos de ejecución del algoritmo menores a los 100 ms.

Además, se encontró que la máscara debe ajustarse al tamaño de la perforación en la imagen para obtener una alta eficacia, es decir, si se desea trabajar con imágenes de baja resolución se requiere un tamaño de máscara menor y viceversa.

Con la metodología descrita en este artículo se facilita dicha implementación con una cámara de bajo costo, ya que se tiene una metodología estandarizada para calibrar el algoritmo con diferentes medios de adquisición de imágenes.

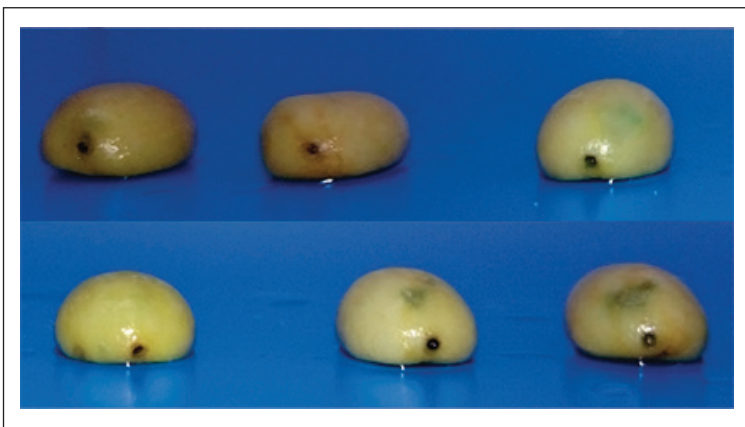


Figura 9. Perforación de la broca del café visible solamente desde costado de los granos.

Adicionalmente, se logró segmentar los demás defectos de los granos visibles a través del pergamino húmedo, incluso se llevó a cabo la segmentación de granos sin despulpar o parcialmente despulpados (comúnmente conocidos como guayaba y mediacara, respectivamente), que presentan intensidades de color relativamente diferentes a las que se observan en otros defectos y en granos sanos, para esto no hubo modificación del algoritmo de segmentación expuesto en la Tabla 1.

En un análisis posterior se expandió el algoritmo para la clasificación de granos sanos y los defectos brocado, guayaba y mediacara. Se creó un índice de perforación al dividir el número total de píxeles de cada grano (área visible del grano), entre el número de píxeles detectados como oscuros (debajo del umbral expuesto anteriormente). Se tomaron como granos negros aquellos cuyo índice es mayor a 0,75 y se definieron como sanos los de índice menor a 0,002; todos los demás se consideraron granos brocados. Se obtuvieron valores de 91,62%, 90,00% y 94,62% de verdaderos positivos para granos brocados, sanos y parcial o totalmente despulpados, respectivamente. La eficacia o sensibilidad del clasificador fue de 92,70%. Gracias a este hallazgo, se han desarrollado paralelamente varios algoritmos para separar estos defectos, con eficacias superiores al 90,00% y serán articulados en el sistema embebido mencionado, para realizar una selección de alrededor de 300 granos/s, donde se tiene como limitación principal el precio final de la máquina.

Actualmente se está estudiando la forma de alimentación del café lavado y su eyección, se están llevando a cabo los diseños pertinentes y se analiza la viabilidad de construcción de los mismos, teniendo en cuenta la capacidad de compra de los caficultores y la complejidad social del agro en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al doctor Pablo Benavides Machado por su ilustración y apoyo en temas relacionados con la biología de la broca. Al personal del Taller de Poscosecha y el Beneficiadero de semilla de Cenicafé. Al Gerente de Almacafé de Manizales doctor Rodrigo Botero Macía y al ingeniero Héctor Jaramillo por permitirnos visitar sus instalaciones.

LITERATURA CITADA

1. ARISTIZÁBAL T., I.D. Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para lavar y clasificar café fermentado. Medellín: Universidad nacional de Colombia, 1995. 195 p. (Tesis: Ingeniero Agrícola).
2. BEE, S. Optical sorting for the coffee industry. Trieste 19 : ASIC, 2001.
3. BENAVIDESM., P.; GONGORAB., C.E.; BUSTILLO P., A.E. IPM program to control coffee berry borer *Hypothenemus hampei*, with emphasis on highly pathogenic mixed strains of *Beauveria bassiana*, to overcome insecticide resistance in Colombia. p. 511-540. En: PERVEEN, F. Insecticides: Advances in integrated pest management. Croatia : InTech, 2012. 708 p.
4. BUSTILLO P., A.E. La comunicación en insectos, reciben mensajes las plantas?: El caso de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari). Tolima : SOCOLEN, 2005. p. 57-85
5. BUSTILLO P., A.E. Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana: La broca del café. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 466 p.
6. BUSTILLO P., A.E.; CÁRDENAS M., R.; VILLALBA G., D.A.; BENAVIDES M., P.; OROZCO H., J.; POSADA F., F.J. Manejo integrado de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en Colombia. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 1998. 134 p.
7. CONSTANTINOC., L.M.; GIL P., Z.N.; JARAMILLO R., A.; BENAVIDES M., P.; BUSTILLO P., A.E. Efecto del cambio y la variabilidad climática en la dinámica de infestación de la broca de café, *Hypothenemus hampei* en la zona central cafetera de Colombia. Tolima : SOCOLEN, 2011. p. 106-121

8. FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters* 27(8):861-874. 2006.
9. GONZÁLEZ, R.C.; WOODS, R.E.; EDDINS, S.L. *Digital image processing using MATLAB: Color image processing*, 2a. ed. Knoxville : Gatesmark publishing, 2009. 329 p.
10. MÁRQUEZ G., S.M. Evaluación y optimización de la operación del tanque sifón para el clasificado del café cereza. Medellín : Universidad nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias, 1987. 117 p. Tesis: Ingeniero agrícola.
11. OLIVERO S.T., C.E.; SANZ U., J.R.; MONTOYAR., E.C.; MORENO C., E.L. Dispositivo hidráulico de bajo impacto ambiental para limpieza y clasificación del café en cereza. *Cenicafé* 60(3):229-238. 2009.
12. OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transaction on systems, man and cybernetics* 9(1):62-66. 1979.
13. RAMOS G., P.J. Diseño, construcción y evaluación de un sistema de identificación de estados de madurez a altas velocidades. Pereira : Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ingeniería eléctrica, 2008. 159 p. Tesis: Magister en ingeniería eléctrica.
14. ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ÁLVAREZ H., J.R.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 300 p.
15. SANZ U., J.R.; RAMOS G., P.J.; CASTRILLÓN C., J.M.; FERRIER, N. Characterization of defective washed coffee beans for electronic sorting. *Saint Petersburg : CIOSTA & CIGR*, 2015. p. 740-749.
16. SANZ U., J.R.; RAMOS G., P.J.; OLIVEROS T., C.E. Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits. En: *IAENG. Transactions on electrical and electronics engineering: Computer society*. San Francisco : IEEE, 2008. p. 167-174.
17. TORRES A., S.E. Clasificación de café pergamino en canal de correteo y en máquina de aire zaranda. Chinchiná : Cenicafé, 1990. 99 p.
18. VILLABONA G., S. Estudio de la separación del café brocado en el canal de correteo. Chinchiná : Cenicafé, 1995. 45 p.