

Colorimetría del Fruto de Café (*Coffea arabica* L.) Durante su Desarrollo y Maduración

Coffee Fruit (*Coffea arabica* L.) Colorimetry During its Development and Maturation

José Jaime Carvajal Herrera¹; Iván Darío Aristizábal Torres²; Carlos Eugenio Oliveros Tascón³
y Jhon Wilson Mejía Montoya⁴

Resumen. Obtener estándares del color del fruto de café durante su desarrollo y maduración es necesario para diferentes procesos relacionados con la cosecha y poscosecha de este producto. Las coordenadas L^* , a^* , b^* , C^* y h^* en la representación de color CIELab y la reflectancia en el espectro visible (400-700 nm) fueron medidas sobre tres diferentes puntos de la epidermis del fruto de *Coffea arabica*, var. Colombia. La medición se realizó cada siete días, desde 182 hasta 238 días después de la antesis (DDA), utilizando un espectrofotómetro de esfera, con el objetivo de determinar cuantitativamente el color del fruto en diferentes estados de desarrollo. Los resultados obtenidos indican que los frutos de diferentes días de maduración presentan diferencias de color definidas por la luminosidad, las coordenadas cromáticas y la cantidad de luz reflejada por la superficie del epicarpio, dependiendo de la región del espectro visible analizada. A través de las coordenadas cromáticas a^* y h^* y de varias longitudes de onda luminosa reflejadas se pueden diferenciar frutos de café de 31, 32, 33 y 34 semanas de desarrollo. El croma b^* no permite diferenciar los frutos pintones de los maduros. La saturación C^* puede discriminar algunos estados de desarrollo pero no permite establecer diferencias entre los estados inmaduros. Las longitudes de onda 520, 570 y 580 nm permiten discriminar significativamente nueve estados diferentes de desarrollo del fruto. El conocimiento de la colorimetría de los frutos de café puede ser usado para el diseño de sistemas de recolección y clasificación poscosecha, y para la adecuada discriminación entre diferentes estados de desarrollo del fruto, los cuales están relacionados con la calidad de la bebida y con la productividad.

Palabras clave: Color, reflectancia, luminosidad, coordenadas cromáticas.

Abstract. Obtain coffee fruit color standards during its development and maturation for different processes related to the harvest and postharvest from this product is necessary. The Coordinates L^* , a^* , b^* , C^* and h^* in the CIELab color representation and visible spectrum reflectance (400-700 nm) were measured on three different points of the epicarp of coffee fruits (*Coffea arabica* var. Colombia). The readings were taken every seven days since 182 to 238 days after anthesis (DAA), using a sphere spectrophotometer, with the objective of determining the fruit color for different development stages. The results indicate that fruits of different days of growth display color differences defined by luminosity, chromatic coordinates and the amount of light reflected by the epicarp according to the analyzed region of the visible spectrum. Through the chromatic coordinates a^* and h^* and from several reflected luminous wavelengths can be differentiated fruits of 31, 32, 33 and 34 weeks of development. The chroma b^* doesn't allow to differentiate undermature and mature fruits. The saturation C^* can discriminate some stages of development but it doesn't allow to establish differences among immature stages. The wavelengths of 520, 570 and 580 nm allow significantly discriminations of nine different stages of the fruit development. The coffee colorimetry knowledge may be used for design of harvesting and post-harvesting sorting systems, and for discrimination among different stages of the fruit development, which are related to the quality of coffee beverage and with productivity.

Key words: Color, reflectance, luminosity, chromaticity coordinates.

La maduración organoléptica es la etapa en la cual muchos productos hortofrutícolas alcanzan las características de color, textura, aroma y sabor que esperan los consumidores. Este proceso inicia generalmente al final de la maduración fisiológica del fruto, antes de la senescencia, dando lugar a diferentes transformaciones físicas, bioquímicas y fisiológicas que determinan su calidad y vida útil. Una de las alteraciones que presentan la mayoría de los frutos es el cambio del color, de forma y de algunas

propiedades físicas y mecánicas (Marín *et al.*, 2003). En el caso particular del café (*Coffea arabica* L.), la calidad en taza guarda relación con el grado de maduración del fruto y este a su vez está asociado con el color del epicarpio ó parte externa visible de la pulpa o cáscara (Azcón y Talón, 2000).

Cuando las personas clasifican visualmente los frutos de café por estados de maduración, hay mucha subjetividad debido a que existen diferentes estados

¹ Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <jjcarvaj@unal.edu.co>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <idaristi@unal.edu.co>

³ Investigador Principal. Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE. Sede Planalto km 4 vía Chinchiná – Manzales, Caldas, Colombia. <carlos.oliveros@cafedecolombia.com>

⁴ Asistente I de Investigación. Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE. Subestación Experimental El Rosario, Venecia, Antioquia, Colombia. <jhonwilsonmm@gmail.com>

Recibido: Mayo 16 de 2011; aceptado: Agosto 08 de 2011.

de desarrollo que aparentemente comparten igual coloración sobre la epidermis.

La determinación del color del fruto de café ha sido relativamente poco investigada de manera objetiva y con métodos cuantitativos comparada a otros productos agrícolas. La colorimetría es un método físico no destructivo muy utilizado para determinar el color de una muestra. Para medir el color se utiliza un instrumento calibrado denominado colorímetro o un espectrofotómetro que también permite obtener la curva espectral. La función del colorímetro, en el caso de un producto vegetal, es describir de una manera cuantitativa la coloración de la epidermis. Existen diferentes modelos propuestos (Carreño *et al.*, 1995; Lana *et al.*, 2006; Mendoza *et al.*, 2006) para facilitar la especificación de objetos en colores de una forma estándar. Los diferentes modelos plantean un sistema de coordenadas tridimensional en el cual se define un sub espacio donde cada color queda definido por un punto único.

El modelo CIELAB se basa en la respuesta de los observadores patrones (estándares) a un estímulo luminoso, es decir, trata de imitar la respuesta humana promedio a las longitudes de onda de la luz y cómo una persona promedio ve el color a través del espectro visible. Este modelo ha sido muy utilizado para el control de calidad de otros productos en la industria de textiles, de pinturas, de alimentos y en otras frutas y hortalizas, debido a su facilidad de diferenciar el color de la muestra con el color patrón o estándar. En este modelo, el espacio de color es un sistema coordinado cartesiano definido por tres coordenadas rectangulares (L^* , a^* , b^*) de magnitudes adimensionales. La coordenada acromática L^* es la luminosidad o claridad y representa si un color es oscuro, gris o claro, variando desde cero para un negro hasta 100 para un blanco. Las coordenadas cromáticas a^* y b^* forman un plano perpendicular a L^* . La coordenada a^* corresponde a rojo si $a^* > 0$, o a verde si $a^* < 0$. La coordenada b^* corresponde al amarillo si $b^* > 0$, y al azul si $b^* < 0$. Un espacio de color similar a CIE $L^*a^*b^*$ es el CIE $L^*C^*h^*$, el cual usa coordenadas cilíndricas en lugar de coordenadas rectangulares. El valor de luminosidad L^* es el mismo, y las coordenadas cromática (C^*) y ángulo de tonalidad (h^*) se definen usando la siguiente formulación:

$$C^* = \left((a^*)^2 + (b^*)^2 \right)^{(1/2)} \quad (1)$$

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{a^*}{b^*} \right) \quad (2)$$

El croma C^* también se conoce como saturación y expresa la separación al centro (eje de claridad L^*) del sistema tridimensional de color. El tono angular h^* expresa el color básico de un objeto (rojo, violeta, azul, verde, amarillo, naranja, ó púrpura). Para estímulos cromáticos varía entre 0° y 360° y para estímulos acromáticos es una magnitud no definida ($a^*=0$, $b^*=0$).

Cuando la luz alcanza una superficie, parte de ésta penetra en ella, pudiendo ser absorbida, dispersada o, incluso si la capa es lo bastante delgada, transmitida. Sin embargo, parte de la luz incidente se ve reflejada por la superficie. La distribución angular de esta luz depende de la naturaleza de la superficie y la luz que se refleja en un ángulo opuesto al de la luz incidente, se llama reflectancia especular. La reflectancia ha sido definida como porcentaje de luz reflejado de un objeto. Los espectrofotómetros miden la reflectancia (%) a varios intervalos de longitudes de onda en el espectro visible (400 a 700 nm) para determinar la curva espectral o "huella digital" del color.

Roa *et al.* (1999), indican que la cosecha de los frutos de café se hace habitualmente con el criterio empírico sobre el color del epicarpio, el cual al madurar presenta una mezcla de tonalidades verdes, amarillas y rojas, según el cultivar o variedad; como resultado, se cosecha una mezcla que incluye frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros y secos. La calidad de la bebida dependerá de la proporción de frutos presentes en los diferentes estados de madurez.

Según Sandoval y Prieto (2007) el color es la principal característica para identificar la madurez de cosecha en la variedad de café Colombia roja. Existen otras variedades donde el color del fruto maduro al momento de la recolección puede ser amarillo o naranja. Para la variedad Colombia roja, el color de la epidermis o epicarpio varía en la gama de los verdes para las primeras etapas, le siguen tonos naranjas y rosados hasta tomar el color rojo de la madurez, y cuando están sobremaduros el color llega a ser violeta oscuro. Sandoval y Prieto (2007) realizaron también la caracterización del café cereza variedad Colombia empleando técnicas de visión artificial a partir de características relacionadas con la textura, la forma y el color de los frutos.

Marín *et al.* (2003) en café variedad Colombia determinaron el color de los frutos para diferentes estados de maduración utilizando un método de

valoración subjetivo basado en la tabla de coloración Pantone. Cárdenas (2007) empleó la tabla estándar para colores denominada "Royal Horticultural Society Colour Chart", y encontró subjetivamente para el fruto maduro de café tres tonalidades diferentes (rojo anaranjado, rojo, rojo púrpura). Ramos *et al.* (2006) midieron los espectros normalizados de la luz reflejada por cerezas de café para diferentes estados de maduración. Betancur *et al.* (2006) desarrollaron un sistema de segmentación de imágenes de frutos de café, adquiridas en el espacio de color RGB, utilizando la técnica SRG de crecimiento de regiones.

La determinación del color también constituye información técnica básica de interés para la agroingeniería, con el propósito de desarrollar sistemas de inspección y clasificación automática de frutos basados en el color, el tamaño, la forma y la textura del producto. Estos sistemas, que en la actualidad se investigan y aplican en muchos otros productos agroalimentarios, apenas vienen desarrollándose para el caso del café (Maya, 2001; Montes, 2001; Montes *et al.*, 2001; Hernández, 2004; Hernández y Prieto, 2005; Betancur *et al.*, 2006; Ramos *et al.*, 2006; Sandoval, 2005; Sandoval y Prieto, 2007; Daza *et al.*, 2007; Mosquera *et al.*, 2007; Ramos *et al.*, 2008), con el fin de retirar impurezas, objetos extraños y materiales con defectos, para procesar de manera automática productos de mejor calidad que permita mantener la reconocida calidad en taza del café colombiano en el competitivo mercado internacional.

Afonso y Corrêa (2003) determinaron, mediante el uso de coordenadas triestímulo, el color de la almendra del café durante varios meses de almacenamiento. Según Carvalho *et al.* (1997), citados por Afonso y Corrêa (2003), el color de los granos de café en almendra está estrechamente relacionado con la calidad del producto.

Considerando que no se dispone de información colorimétrica en el espacio CIELAB y de la reflectancia basado en estados de desarrollo de frutos identificados en campo a partir de la marcación de la floración, el objetivo de esta investigación fue evaluar cuantitativamente el color de la epidermis de fruto del café durante su desarrollo utilizando el sistema de color CIELAB y la reflectancia en el espectro visible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se llevó a cabo en la subestación experimental El Rosario del Centro

Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ, localizada en la vereda El Cerro, municipio de Venecia, departamento de Antioquia (Latitud 05°58' N., Longitud 75°43' O; 1.630 msnm), con temperatura media de 20,1 °C) y en los laboratorios de procesos agrícolas y control de calidad de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Frutos de café. Se utilizó un lote de café var. Colombia de frutos maduros rojos de 1.403 árboles, a libre exposición solar, con una distancia de siembra de 1 m x 1 m, plantado en mayo de 1999 y renovado por zoca en febrero de 2006. Se seleccionaron al azar 102 árboles en los que se marcó la antesis en dos a tres ramas por árbol. Se utilizó como referencia la escala de maduración propuesta por Marín *et al.* (2003). Cada siete días a partir de 182 y hasta los 238 días después de la antesis (DDA) se cosechó al azar de uno a tres frutos por cada rama marcada. Los frutos se transportaron refrigerados a una temperatura entre 12 y 15 °C para realizar la medición del color en el laboratorio.

Medida del color de la epidermis de fruto. Se utilizó un espectrofotómetro de esfera X-Rite® modelo SP64 con iluminante estándar D65, ángulo de observador de 10° con apertura de medición de 4 mm de diámetro previamente calibrado sobre una superficie plana (referencia blanco, $L^* = 93,11$, $a^* = -1,24$, $b^* = 0,44$; referencia negro $L^* = 0$, $a^* = 0$, $b^* = 0$) y se usó el software X-Rite® para el procesamiento de los datos obtenidos. En cada muestreo semanal, de todos los frutos cosechados se seleccionaron aleatoriamente 300. A cada fruto, sobre la superficie del epicarpio, rotándolo 90° alrededor de su eje longitudinal, se le realizaron tres mediciones de color. El equipo registró las coordenadas L^* , a^* , b^* , C^* , h^* y la curva de reflectancia especular en el rango espectral visible (400 a 700 nm) a intervalos de 10 nm para obtener la longitud de onda (nm) predominantemente reflejada (reflectancia, %). En total cada semana fueron registradas 900 mediciones del color de la epidermis.

Análisis estadístico. Se calculó el promedio y el coeficiente de variación de cada una de las variables de color evaluadas. Mediante análisis de varianza y la prueba de Duncan se realizaron comparaciones múltiples, a un nivel de confianza del 95%, para determinar las diferencias estadísticas en las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* , c^* , h^* , y en la reflectancia (%) para nueve diferentes estados de

desarrollo de los frutos (182, 189, 196, 203, 210, 217, 224, 231 y 238 DDA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coordenadas cromáticas de color $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*h^*$. En la Figura 1 se presentan imágenes típicas de los nueve estados de desarrollo de los frutos entre 182 y 238 DDA. Para los frutos verdes, entre 182 a 210 DDA, durante su caracterización no se observaron diferencias notables en color (columnas 2 y 3). A los 217 días de desarrollo los frutos se tornaron de tonalidad verde amarillo. A los 224 días se caracterizaron como pintones (tonalidad verde-amarillo-naranja-rojiza). En

este estado de desarrollo del fruto el color verde se localiza cerca al pedúnculo. A los 231 días los frutos se caracterizaron como maduros (frutos principalmente de color rojo) y a los 238 días se caracterizaron como frutos sobremaduros (color rojo intenso-violeta). Los recuadros rectangulares (columna 4) corresponden al color medio obtenido por el software X-Rite utilizando 900 registros por cada estado de desarrollo. Los resultados de caracterización de frutos por su color de acuerdo al tiempo de desarrollo difieren a los obtenidos por Sandoval y Prieto (2007) quienes definieron 11 estados de maduración de los frutos de café variedad Colombia roja en ocho semanas, mediante seis espacios de color diferentes a los usados en este estudio.




























DDA	Muestreo	Fruto	Color medio
182			
189			
196			
203			
210			
217			
224			
231			
238			

Figura 1. Caracterización de los estados de desarrollo y color medio de los frutos de café var. Colombia.

En la Tabla 1 se presentan los valores medios y coeficientes de variación obtenidos en la evaluación de color de la epidermis de los frutos de café para cada uno de los nueve estados de desarrollo empleando las coordenadas rectangulares $L^*a^*b^*$ y las coordenadas cilíndricas $L^*C^*h^*$.

La luminosidad L^* de los frutos de café presentó diferencias estadísticas entre los diferentes estados

de desarrollo. Los frutos verdes incrementaron su luminosidad desde 43,18 a los 182 días (verde oscuro) hasta 49,8 a los 217 días (verde amarillo). A partir de este estado disminuyó significativamente la luminosidad de la epidermis alcanzando valores de 37,88 en los pintones, 35,94 en los maduros, y 30,5 en los frutos sobremaduros. La luminosidad del fruto varió con el estado de desarrollo alcanzando su mayor intensidad en los frutos de 31 semanas de desarrollo.

Tabla 1. Coordenadas cromáticas de color de la epidermis de los frutos de café var. Colombia durante la maduración.

DDA	L^*	CV (%)	a^*	CV (%)	b^*	CV (%)	C^*	CV (%)	h^*	CV (%)					
182	43,18	d ^x	6,44	-7,73	a	-9,87	23,04	c	15,27	24,33	c	14,10	108,84	g	2,40
189	43,66	e	6,42	-7,90	a	-11,29	25,01	ef	14,82	26,26	fg	13,66	107,82	f	2,62
196	44,18	f	6,76	-7,32	b	-13,80	24,96	e	16,01	26,06	ef	14,66	106,73	e	3,20
203	45,16	h	6,44	-7,34	b	-14,74	25,38	f	15,80	26,47	g	14,37	106,54	e	3,36
210	44,70	g	6,38	-7,18	b	-14,03	24,18	d	16,52	25,27	d	15,13	106,93	ef	3,25
217	49,80	i	9,47	-1,37	c	-534,47	24,50	d	18,27	25,71	e	14,97	92,57	d	19,68
224	37,88	c	11,54	16,79	e	30,33	11,74	b	47,51	21,40	b	20,24	34,04	c	48,80
231	35,94	b	9,10	17,90	f	18,75	11,81	b	34,90	21,77	b	17,31	32,86	b	29,69
238	30,50	a	4,32	9,70	d	34,81	2,76	a	48,99	10,12	a	34,99	15,74	a	33,85

^x En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística según prueba de Duncan al 5%.

El análisis estadístico mostró seis grupos homogéneos respecto al croma a^* . El primer grupo correspondió a los frutos de 182 y 189 días de desarrollo correspondientes a verdes oscuros ($-7,90 \leq a^* \leq -7,73$); luego aparece un segundo grupo de verdes más claros, $-7,34 \leq a^* \leq -7,18$, (196, 203 y 210 días de desarrollo); el tercer grupo correspondió a los frutos verde amarillo, $a^* = -1,37$ (217 días); el cuarto grupo correspondió a los pintones con tonalidad rojiza con un $a^* = 16,79$; el quinto grupo correspondió a los frutos maduros con el mayor contenido de rojo en la epidermis, $a^* = 17,90$. El sexto grupo es el de los frutos sobremaduros con $a^* = 9,7$ que indica la presencia de tonalidad rojiza en menor cantidad que los maduros. Se encontró que la coordenada cromática a^* aumenta de verdes a maduros y luego decrece entre el fruto maduro (color rojo) y el sobremaduro (color rojo intenso violeta). De acuerdo a estos resultados mediante la coordenada cromática a^* se pueden diferenciar frutos de café de 31, 32, 33 y 34 semanas.

Respecto al croma b^* el análisis estadístico mostró cinco grupos homogéneos. El primer grupo correspondió

a los frutos sobremaduros (238 días) con escaso contenido de amarillo ($b^* = 2,76$); el segundo grupo correspondió a los pintones y maduros (224 y 231 días) con $11,7 \leq b^* \leq 11,81$; el tercer grupo fue el de los verdes más inmaduros (182 días) con $b^* = 23,04$; el cuarto grupo correspondió a los frutos verde brillante (210 días) y verde amarillo (217 días) con $24,18 \leq b^* \leq 24,50$; y el quinto grupo fue el de los frutos verdes de 189, 196 y 203 días, el cual presentó un rango b^* entre 24,96 y 25,38, constituyendo estos tres estados de desarrollo los de mayor presencia de tonalidad amarilla en el epicarpio. De acuerdo a los resultados el croma b^* no permite diferenciar los pintones de los maduros.

El croma C^* o saturación disminuyó su valor medio de los frutos verdes (valores entre 26,47 y 24,33) al grupo de los frutos pintón y maduros (valores de 21,40 y 21,77) y sobremaduros, estado de desarrollo con la menor saturación ($C^* = 10,12$). De acuerdo a la Tabla 1 la coordenada cromática C^* puede discriminar algunos estados de desarrollo pero no permite establecer diferencias de color entre los estados

inmaduros de frutos de café, esto es debido a que en el círculo cromático los diferentes colores pueden llegar a tener el mismo valor de saturación (C^*) aunque sea diferente su tonalidad. Igual resultado se presentó en tomates durante su maduración según López y Gómez (2004) y Oliva *et al.* (2007), quienes encontraron que C^* no presenta diferencia estadística entre varios estados de maduración del tomate mientras que el parámetro h^* y la relación a^*/b^* si la tienen.

La tonalidad o coordenada h^* disminuyó durante la maduración del café, desde los frutos verdes de 182 días con 108,84 a los frutos verdes de 189 y 210 días con valores que fluctuaron entre 107,82 y 106,54, y decreció significativamente en los demás estados de desarrollo evaluados verde amarillo ($h^*=92,57$), pintón ($h^*=34,04$), maduro ($h^*=32,86$) y sobremaduro ($h^* = 15,74$), permitiendo diferenciar estos estados de maduración (Tabla 1).

Durante el proceso de maduración del café var. Colombia cereza roja aumentó el croma a^* y disminuyó el tono h^* , tendencia similar fue observada para frutos de melocotón por Ferrer *et al.* (2005) quienes encontraron que el valor h^* disminuyó de forma lineal durante la maduración, y por Padilla (2009) quien reportó también en melocotón que a^* y h^* presentaron una relación inversa a medida que la fruta maduró (pasó de un tono amarillo verdoso a un tono amarillo o naranja o naranja rojizo). Además se ratifica lo observado por Maya (2001) en café cereza, que a mayor grado de maduración menor es la media del tono h^* , y a menor grado de maduración la media del tono h^* es mayor, según histogramas de imagen digital calculados por dicho autor.

Reflectancia en el espectro electromagnético visible. En la Figura 2 se presentan las curvas promedio de reflectancia de la epidermis del fruto de café, en diferentes días después de la antesis (DDA).

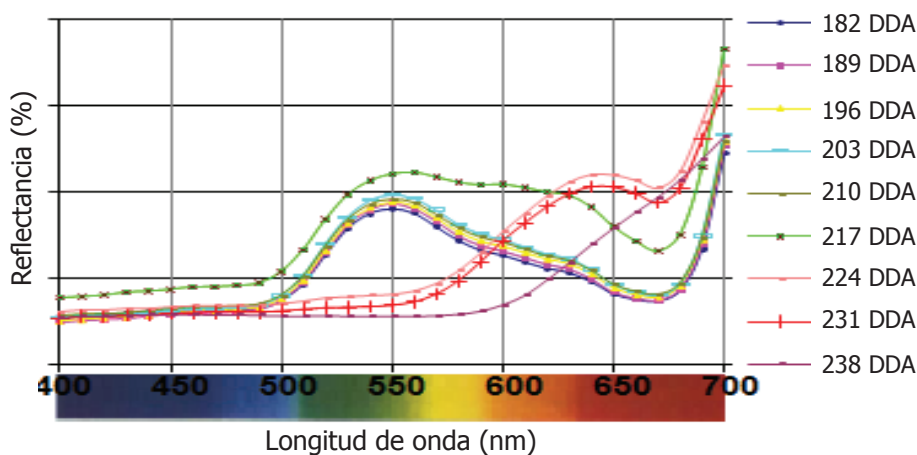


Figura 2. Curvas de reflectancia de la epidermis del fruto de café en diferentes días después de la antesis (DDA).

Los resultados obtenidos indican que el grupo de los primeros cinco estados de desarrollo (182, 189, 196, 203 y 210 DDA) correspondientes a frutos inmaduros (verdes), presenta el mismo comportamiento de reflectancia en el espectro de longitudes de onda estudiado. Este grupo de estados registró un pico promedio en la longitud de onda de 550 nm que varió entre 18,04 y 19,74% de luz reflejada, correspondiente a la zona del color verde en el espectro, y presentó un promedio entre 24,49 y 25,90% de luz reflejada por la epidermis en la longitud de 700 nm, correspondiente a la zona del rojo. Estos resultados difieren de los obtenidos por Ramos *et al.* (2006), quienes realizaron una observación global

de los espectros, reportando para frutos verdes picos máximos de reflectancia entre 560 nm y 610 nm. Muy probablemente estos autores no encontraron picos máximos de luz reflejada en 550 nm, que ocurren para todos los frutos de 182 - 210 DDA, debido a que los frutos evaluados por ellos, presentaban mayor desarrollo fenológico. Los frutos que fueron cosechados con 217 DDA en este estudio presentaron un pico promedio de reflectancia en 560 nm similar al reportado por Ramos *et al.* (2006).

En las Tablas 2 y 3 se muestran, respectivamente, los valores medios de reflectancia (%) en el espectro visible

y los respectivos coeficientes de variación (%) para los diferentes estados de desarrollo de los frutos de café. Los frutos verde-amarillo y los pintones presentaron mayor heterogeneidad (C.V. más altos; hasta 37,4 y 39,0%, respectivamente) mientras los frutos sobremaduros de 238 días y los verdes de 182 días presentaron mayor homogeneidad en los valores medios de reflectancia (C.V. menores; 6,5 y 6,7%, respectivamente). Para las longitudes de onda en el rango de 570 a 650 nm la luz reflejada por la superficie del fruto presentó, para

todos los estados de maduración del café, coeficientes de variación relativamente bajos alrededor del 20%. Los coeficientes de variación obtenidos en esta variable, en general, que no son altos considerando que frutos de una misma floración pueden presentar diferencias notorias en su desarrollo y color (Figura 3). Los coeficientes de variación tampoco representan un solapamiento de la reflectancia para los estados de desarrollo evaluados y no existe traslape de los valores medios a un intervalo de confianza del 95% según la prueba de Duncan aplicada.

Tabla 2. Valores promedios de reflectancia (%) en el espectro visible de la epidermis de frutos de café var. Colombia según el estado de desarrollo.

λ (nm)	182 DDA	189 DDA	196 DDA	203 DDA	210 DDA	217 DDA	224 DDA	231 DDA	238 DDA
400	5,521 e*	4,886 a	5,063 b	5,490 de	5,645 f	7,745 h	6,150 g	5,280 c	5,384 cd
410	5,553 c	5,096 a	5,241 b	5,662 c	5,809 d	7,901 f	6,357 e	5,572 c	5,626 c
420	5,656 cd	5,239 a	5,386 b	5,709 d	5,821 e	8,057 g	6,362 f	5,553 c	5,623 cd
430	5,795 cd	5,326 a	5,533 b	5,850 d	5,968 e	8,396 g	6,540 f	5,733 c	5,749 c
440	6,005 d	5,589 a	5,728 b	6,064 d	6,177 e	8,529 g	6,544 f	5,719 b	5,856 c
450	6,122 b	5,871 a	6,075 b	6,342 c	6,455 d	8,724 f	6,721 e	5,941 a	5,857 a
460	6,286 c	6,014 b	6,262 c	6,554 d	6,641 e	9,017 g	6,831 f	6,021 b	5,893 a
470	6,245 c	6,031 b	6,296 c	6,543 d	6,656 e	9,025 g	6,860 f	6,100 b	5,820 a
480	6,344 c	6,170 b	6,409 c	6,660 d	6,773 e	9,179 g	6,868 f	6,098 b	5,839 a
490	6,515 d	6,400 c	6,645 e	6,900 fg	6,982 g	9,455 h	6,856 f	6,080 b	5,762 a
500	7,364 d	7,375 d	7,642 e	7,982 f	7,986 f	10,786 g	7,059 c	6,221 b	5,700 a
510	9,368 d	9,526 d	9,818 e	10,298 f	10,203 f	13,309 g	7,381 c	6,391 b	5,688 a
520	12,696 d	12,992 e	13,246 f	13,940 h	13,690 g	16,798 i	7,749 c	6,579 b	5,724 a
530	15,729 d	16,130 e	16,368e	17,113 g	16,758 f	19,654 h	7,892 c	6,631 b	5,681 a
540	17,489 d	17,942 e	18,174 e	19,056 g	18,535 f	21,310 h	8,016 c	6,724 b	5,687 a
550	18,041 d	18,651 e	18,86 ef	19,740 g	19,146 f	22,096 h	8,157 c	6,869 b	5,653 a
560	17,549 d	18,071 e	18,468 f	19,302 g	18,775 f	22,300 h	8,548 c	7,246 b	5,649 a
570	15,997 d	16,637 e	17,034 f	17,950 h	17,377 g	21,754 i	9,415 c	8,149 b	5,730 a
580	14,395 d	14,935 e	15,451 f	16,312 h	15,836 g	21,145 i	10,859 c	9,675 b	5,893 a
590	13,266 c	13,820 d	14,35 e	15,163 g	14,747 f	20,826 h	12,930 c	11,886 b	6,244 a
600	12,674 b	13,153 c	13,757 d	14,496 e	14,152 e	20,903 g	15,365 f	14,344 e	6,973 a
610	11,897 b	12,395 c	13,012 d	13,658 e	13,332 de	20,516 h	17,519 g	16,460 f	8,067 a
620	11,157 b	11,608 c	12,254 d	12,825 e	12,543 de	20,020 h	19,536g	18,361 f	9,841 a
630	10,660 a	11,085 b	11,704 c	12,289 d	12,028 cd	19,629 e	21,163 f	19,880 e	11,862 c
640	9,622 a	9,914 a	10,514 b	11,028 c	10,876 c	18,272 e	22,038g	20,710 f	13,926 d
650	8,209 a	8,373 a	8,916 b	9,306 c	9,266 bc	15,999 d	22,010 f	20,692 e	15,875 d
660	7,567 a	7,662 a	8,120 b	8,422 b	8,445 b	14,331 c	21,389 f	19,930 e	17,696 d
670	7,370 a	7,446 a	7,824 b	8,041 b	8,120 b	13,157 c	20,484 f	18,797 d	19,430 e
680	8,575 a	8,729 a	9,123 b	9,355 b	9,392 b	15,021 c	22,310 f	20,470 d	21,443 e
690	13,438 a	13,940 b	14,471 c	14,935 d	14,664 cd	22,862 e	28,111 h	26,183 g	23,862 f
700	24,492 a	25,352 b	25,840 bc	26,654 d	25,904 c	36,535g	34,737 f	32,441 e	26,424 d

*En una fila promedios con letra diferente presentan diferencia estadística según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 3. Coeficientes de variación (%) de los valores medios de reflectancia de frutos de café var. Colombia mostrados en la Tabla 2.

λ (nm)	182 DDA	189 DDA	196 DDA	203 DDA	210 DDA	217 DDA	224 DDA	231 DDA	238 DDA
400	9,56	20,05	16,52	14,07	17,89	22,41	13,76	20,80	13,43
410	9,17	17,52	14,48	12,69	16,14	21,18	12,69	18,37	11,32
420	7,82	14,10	11,00	10,23	13,12	19,72	11,01	15,86	9,64
430	8,35	12,42	10,14	9,30	11,87	19,27	9,65	14,41	8,31
440	6,71	9,65	8,05	7,42	9,51	19,38	9,11	13,04	6,94
450	7,56	9,12	7,80	7,49	8,26	18,01	9,87	11,76	6,89
460	7,58	8,97	7,84	7,55	7,91	18,23	10,38	11,44	6,60
470	7,93	9,20	8,20	7,95	8,09	17,77	11,48	11,98	6,76
480	7,97	9,04	8,24	8,03	7,93	18,05	11,59	11,69	6,50
490	8,60	9,78	9,07	8,86	8,62	18,19	12,88	12,19	6,47
500	10,65	12,31	11,97	11,41	11,04	19,73	17,27	14,22	6,58
510	12,99	14,91	14,76	13,82	13,59	21,31	23,71	17,39	6,57
520	13,87	15,29	15,30	14,27	14,26	22,76	30,11	20,50	6,52
530	13,34	14,18	14,40	13,52	13,62	24,69	34,12	22,41	6,54
540	12,93	13,51	13,98	13,29	13,37	25,53	36,26	23,61	6,48
550	12,88	13,38	14,01	13,45	13,48	25,66	37,88	24,85	6,58
560	13,15	13,78	14,56	14,07	14,00	24,98	38,85	26,78	6,74
570	13,82	14,78	15,79	15,45	15,30	22,97	39,03	28,60	7,05
580	14,44	15,80	17,05	16,78	16,51	22,38	37,19	28,83	8,00
590	14,80	16,41	17,82	17,57	17,22	23,30	33,22	26,667	10,98
600	14,92	16,67	18,18	18,05	17,58	25,01	28,52	23,59	15,73
610	15,07	16,99	18,54	18,47	17,95	27,23	24,24	20,70	20,26
620	15,13	17,25	18,79	18,73	18,08	29,67	20,55	18,13	22,32
630	15,13	17,36	18,95	18,88	18,16	31,68	18,67	16,61	22,49
640	14,34	16,60	18,37	18,53	17,68	34,35	18,43	16,24	21,81
650	12,85	14,95	16,69	17,24	16,17	37,36	20,23	17,03	21,20
660	11,42	13,15	14,39	14,98	13,79	37,19	23,30	18,69	20,31
670	10,35	11,48	11,84	12,20	11,07	34,55	27,62	21,25	19,25
680	11,73	13,01	13,00	12,95	11,88	32,87	25,62	19,98	18,25
690	15,11	16,63	16,66	15,93	15,19	29,81	16,37	14,42	17,38
700	14,33	14,99	14,97	14,04	13,86	22,76	11,92	12,90	16,40

Los frutos pintones (224 días) y maduros (231 días) presentaron entre sí diferencias estadísticas en todas las longitudes de onda evaluadas (400 – 700 nm). Además se evidenciaron diferencias en la luz reflejada por los frutos de color verde amarillo (217 días) y los demás estados de desarrollo, excepto con los maduros y sobremaduros en las longitudes de onda 630 nm y 650 nm, respectivamente. El pico promedio (20,7%) de reflectancia obtenido para los maduros a 640 nm se encuentra dentro del intervalo de longitudes de ondas de 610 a 650 nm mencionado por Ramos *et al.* (2006).

El análisis estadístico aplicando diferencias múltiples mediante la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95% a la variable reflectancia (Figura 4) indica que

es posible discriminar los nueve estados evaluados de desarrollo del fruto con la longitud de onda 520 nm, que corresponde en el espectro visible a la zona de transición de azul a verde (aproximadamente color aguamarina), y con las longitudes de onda de 570 y 580 nm, que corresponden a la zona del amarillo en el espectro electromagnético, resultado que corrobora lo planteado por Mosquera *et al.* (2007) respecto a la longitud de onda cercana al amarillo para la discriminación entre frutos verdes y maduros. La luz reflejada a 630 nm no permite discriminar frutos verde amarillo de maduros.

Los resultados de la Tabla 2 también indican que todas las longitudes de onda entre 500 y 690 nm excepto 590, 600, 630, y 650 nm, permiten discriminar el porcentaje

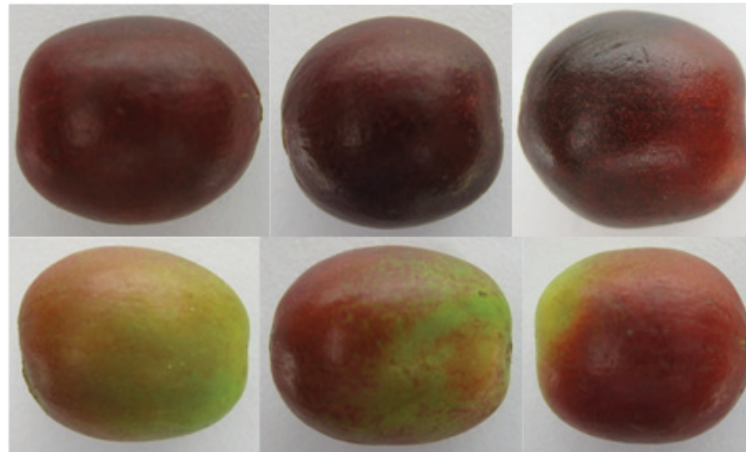


Figura 3. Distribución heterogénea de tonalidad de frutos de café var. Colombia de 238 días y 224 días.

de luz reflejada entre los siguientes frutos: verdes (182 a 210 días) y verde-amarillos (217 días); verdes (182 a 210 días) y pintones (224 días); verdes (182 a 210 días) y maduros (231 días); verdes (182 a 210 días) y sobremaduros (238 días); verde-amarillo (217 días) y

pintones (224 días); verde-amarillo (217 días) y maduros (231 días); verde-amarillo (217 días) y sobremaduros (238 días); pintones (224 días) y maduros (231 días); pintones (224 días) y sobremaduros (238 días); maduros (231 días) y sobremaduros (238 días).

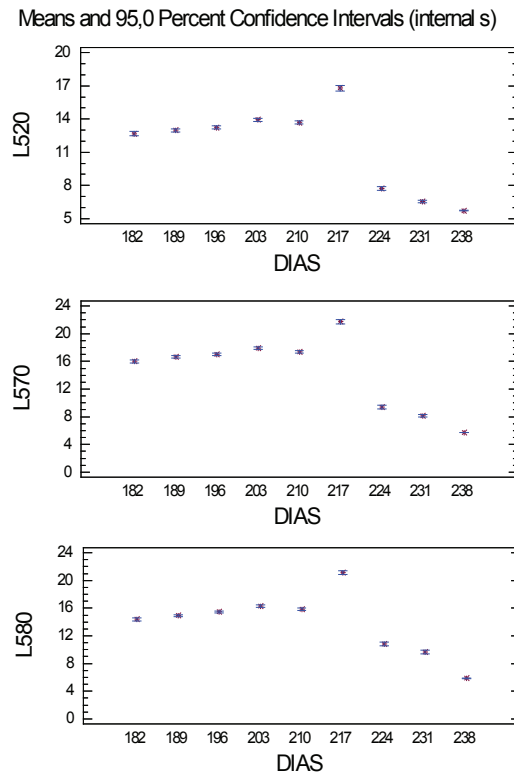


Figura 4. Medias e intervalos de confianza al 95% de la reflectancia de los frutos de café var. Colombia para las longitudes de onda discriminantes L520, L570 y L580.

Los frutos con un estado de desarrollo de 217 días, de color verde-amarillo, presentaron estadísticamente mayor composición de luz reflejada para todas las longitudes de onda evaluadas que el resto de estados inmaduros. Un pico promedio de reflectancia del 22,30 % se presentó para este grupo de frutos en la longitud de onda de 560 nm, correspondiente a la zona del espectro verde más cercana al amarillo, y mayor cantidad de luz reflejada con un promedio del 36,53 % en la longitud de onda de 700 nm, correspondiente a la zona del rojo del espectro visible, comparado con las demás longitudes de ondas evaluadas (Figura 2).

El grupo de los frutos sobremaduros (238 días) presentó una curva de reflectancia ascendente con un valor máximo del 26,42% de luz reflejada en la longitud de onda de 700 nm, correspondiente a la zona del rojo en el espectro (Figura 2). Los frutos maduros (231 días) no presentaron diferencias en la luz reflejada respecto a los sobremaduros (238 días) en las longitudes de onda de 400, 410, 420, 430 y 450 nm. Para el resto de longitudes de onda hubo diferencia estadística en esta variable entre estos dos estados de desarrollo. Ramos *et al.* (2006) registraron un pico de reflectancia para frutos sobremaduros entre 610 y 650 nm diferente a lo obtenido en este estudio, la diferencia se debe posiblemente a que los frutos que ellos evaluaron eran sobremaduros con coloraciones correspondientes a los estados sobremaduro y maduro (transición de maduro a sobremaduro, es decir con un desarrollo que estaría entre 231 y 238 días), además los autores no indican en qué parte de la epidermis observaron los picos de luz visible. Los frutos sobremaduros (238 días) presentaron diferencias en la luz reflejada a 460 y 620 nm respecto a los demás estados (frutos verdes, pintones y maduros).

Al observar el color de la epidermis de las cerezas del café en sus diferentes estados, se encontró tanto el patrón homogéneo como heterogéneo de distribución del color, corroborando lo planteado por Marín *et al.* (2003) respecto a que la coloración no es uniforme para los estados pintón, maduro y sobremaduro, y lo informado por Sandoval y Prieto (2007) que en el proceso de maduración del café se tienen etapas donde un color se presenta de manera homogénea sobre toda la epidermis, mientras que en otras etapas hay una variación suave o brusca de diferentes colores. Por ejemplo en la Figura 3, parte superior de izquierda a derecha, se observan dos frutos de 238 DDA con distribución homogénea del color sobre su epidermis y otro fruto del mismo tiempo de

desarrollo con distribución heterogénea (tonalidad violeta cerca a su disco u ombligo y tonalidad rojo cerca a su pedúnculo). Además el fruto pintón es uno de los estados de desarrollo donde el color es muy heterogéneo, casi siempre el fruto presenta mayor coloración roja cerca del disco, es decir allí cambia más rápido la tonalidad de color que en la parte próxima al pedúnculo (color verde), como se observa en los frutos de la parte inferior de la Figura 3.

Se apreció en los estados de desarrollo de 217, 224, 231 y 238 días que un fruto puede presentar longitudes de onda diferentes donde ocurre la máxima reflectancia. En cambio para los frutos verdes de 182 a 210 DDA solo se encontró que el máximo pico de luz reflejada por la epidermis de café ocurre para la longitud de onda de 550 nm, aunque algunos frutos visualmente presenten una tonalidad verde más clara en una cara que en el lado opuesto.

Es probable que los picos hallados de la luz reflejada por la epidermis del café para las longitudes de onda evaluadas no correspondan exactamente al pico máximo o mínimo de porcentaje de reflectancia real, debido a que las mediciones fueron efectuadas a intervalos de 10 nm por limitaciones del espectrofotómetro.

Muchas frutas que en la primera etapa son de color verde y luego durante su desarrollo presentan tonalidades amarillas, naranjas, rojo y rojo oscuro, presentan un comportamiento similar al observado para el fruto del café en el espectro visible del café cereza, como las curvas de reflectancia de manzanas (Merzlyak *et al.*, 2003) y de cerezas maduras (Xing y Guyer, 2008).

Los picos de las curvas espectrales de la epidermis del fruto del café halladas para los diferentes estados de maduración podrían ser explicadas por las características de absorción y reflectancia de los pigmentos presentes en la epidermis del fruto. Marín *et al.* (2003) midieron el contenido de los pigmentos de la epidermis del café (clorofilas, carotenoides y antocianinas) y encontraron que los frutos verdes de diferentes días de desarrollo no presentaron diferencias en su contenido de clorofila, y también para frutos maduros y sobremaduros y algunos pintones no reportaron contenido de clorofila pero si contenido de carotenoides, el cual no presentó diferencia estadística entre los tres estados de desarrollo evaluados. Comportamiento similar se presenta en otros frutos, como el melocotón, donde Ferrer *et al.*,

(2005) concluyeron que el cambio en la reflectancia entre 450 y 530 nm se relaciona con las variaciones en la distribución de los contenidos de carotenoides. Es así que el menor porcentaje de reflectancia de los colores del extremo inferior del espectro visible, alrededor de la longitud azul (aproximadamente 400 nm - 500 nm) y del extremo superior, cerca a la longitud naranja-rojo (alrededor de 670 nm, pico mínimo de reflectancia para todos los frutos evaluados, excepto el sobremaduro), es característico de la clorofila que absorbe en mayor cantidad la luz de esta región del espectro, pero refleja más luz alrededor de la longitud de onda 550 nm, lo que hace ver al fruto inmaduro de color verde. Cuando el fruto es de color verde-amarillo (verde-rojizo color no detectado por el ojo humano) refleja más la región verde, amarillo, naranja y rojo del espectro visible, luego el fruto pasa a ser pintón (rojo-verdoso). Por último, el fruto maduro refleja más la luz de la región del rojo que el sobremaduro. Autores como Merzlyak *et al.* (2003) han estudiado una gama de pigmentos (clorofila, carotenoides y antocianinas) de la cáscara de las manzanas y los han relacionado con la curva espectral con el fin de desarrollar técnicas no destructivas para la evaluación del pigmento.

CONCLUSIONES

Los frutos de café var. Colombia de distintos días de desarrollo presentan cuantitativamente diferencias de color definidas por las coordenadas cromáticas (a^* , b^* , C^* y h^*) y acromática (L^*), y por la cantidad de luz reflejada por la superficie del epicarpio del fruto dependiendo de la región del espectro visible analizada.

La luminosidad del fruto de café varía con el estado de desarrollo alcanzando su mayor intensidad en frutos de 31 semanas de desarrollo. A través de las coordenadas cromáticas a^* y h^* y de varias longitudes de onda luminosa reflejada por la epidermis se pueden diferenciar frutos de café de 31, 32, 33 y 34 semanas de desarrollo.

A través de la cantidad de luz reflejada por la epidermis en la región límite entre el naranja y el rojo del espectro visible (640 nm) se pueden discriminar los frutos verdes de menos de 30 semanas de los frutos verde-amarillos de 31 semanas, de los pintones y maduros (32 - 33 semanas) y de los sobremaduros (34 semanas). Los frutos pintones (32 semanas) presentaron respecto a los maduros (33 semanas) diferencias en la luz reflejada para todas las longitudes de onda analizadas. Las longitudes de onda 520, 570 y 580 nm permiten

discriminar significativamente nueve estados diferentes de desarrollo del fruto de café cereza.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones los resultados obtenidos en este estudio podrían ser utilizados como patrón o estándar del color del fruto de café según el estado de desarrollo. Se recomienda implementar un clasificador que emplee las características estudiadas para evaluar y comparar el desempeño de este sistema de selección, contra otros sistemas similares reportados en la literatura y citados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Afonso, P.C. e P.C. Corrêa. 2003. Influência do tempo de armazenagem na cor dos grãos de café pré-processados por "via seca" e "via úmida". *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras 27(6): 1268-1276.

Azcón, J. y M. Talón. 2000. *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw Hill Interamericana, Barcelona. 656 p.

Betancur, J.A, F.A. Prieto y G.A. Osorio. 2006. Segmentación de frutos de café mediante métodos de crecimiento de regiones. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 59(1): 3311-3333.

Cárdenas, S.I. 2007. Caracterización morfológica y agronómica de la colección núcleo de café (*Coffea arabica* L.) del CATIE. Tesis de Magister Scientiae en Agricultura Ecológica. Escuela de Posgrado. Programa de educación para el desarrollo y la conservación. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Turrialba, Costa Rica. 34 p.

Carreño, J., A. Martínez, L. Almendra and J. Fernandez . 1995. Proposal of an index for the objective evaluation of the colour of red table grapes. *Food Research International* 28(4): 373-311.

Daza, G., L.G. Sánchez y J.F. Suárez. 2007. Selección de características orientadas a sistemas de reconocimiento de granos maduros de café. *Scientia et Technica* 13(35): 139-144.

Ferrer, A., S. Remón, A. Negueruela and R. Oria. 2005. Changes during the ripening of the very late season Spanish peach cultivar Calanda. Feasibility of using CIELAB coordinates as maturity indices. *Scientia Horticulturae* 105(4): 435-446.

- Hernández, J.E. 2004. Clasificación de frutos de café según su etapa de maduración basada en redes neuronales artificiales. Trabajo de grado. Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 82 p.
- Hernández, J.E. y F. Prieto. 2005. Clasificación de granos de café usando FPGA. Ingeniería y Competitividad 7(2): 35-42.
- Lana, M., L. Tijskens and O. Van Kooten. 2006. Effects of storage temperature and stage of ripening on RGB colour aspects of fresh-cut tomato pericarp using video image analysis. Journal of Food Engineering 77(4): 871-879.
- López, A.F., and P.A. Gómez. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. Horticultura Brasileira 22(3): 534-537.
- Marín, S.M., J. Arcila, E. Montoya y C. Oliveros. 2003. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). Cenicafé 54(3): 208-225.
- Maya, C. 2001. Desarrollo de un algoritmo para la caracterización y la clasificación de granos de café empleando técnicas de visión artificial. Trabajo de grado. Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 39 p.
- Mendoza, F., P. Dejmek and J. Aguilera. 2006. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. Postharvest Biology and Technology 41(3): 285-295.
- Merzlyak, M.N., A.E. Solovchenko and A.A. Gitelson. 2003. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. Postharvest Biology and Technology 27(2): 197-211.
- Montes, N.L. 2001. Desarrollo de algoritmos de segmentación de frutos maduros y verdes de café en imágenes tomadas en condiciones controladas, basados en las propiedades de color. Trabajo de grado. Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 44 p.
- Montes, N.L., G. Osorio, F. Prieto y F. Angulo. 2001. La visión artificial aplicada al proceso de producción del café. Dyna 133: 41-49.
- Mosquera, J.C., C.A. Isaza y A. Sepúlveda. 2007. Procesamiento de imágenes ópticas de frutos café en cereza por medio de filtros acusto-ópticos. Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte 21: 93-102.
- Oliva, L.A., L.M. Zapata, L.M. Gerard, y C.V. Davies. 2007. Variación del color durante el crecimiento, almacenamiento, maduración y comercialización del tomate. En: Cuenca Rural.com, <http://www.cuencarural.com/frutihorticultura/frutihorticultura/56769-variacion-del-color-durante-el-crecimiento-almacenamiento-maduracion-y-comercializacion-del-tomate/>.3 p.; consulta: octubre 2009.
- Padilla, M.C. 2009. Relación entre la madurez aparente al cosechar y la calidad post-cosecha de cultivares de melocotón [*Prunus persica* L. Batsch] con bajo requerimiento de horas-frío en Puerto Rico. Tesis Maestro en Ciencias en Horticultura. Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico. 40 p.
- Ramos, P., C. Valdés, E. Gómez, J. Sanz y E. Solarte. 2006. Características espectrales de la luz reflejada por frutos de café (*Coffea arabica*). Revista Colombiana de Física 38(2): 822-825.
- Ramos, P.J., J.R. Sanz and C.E. Oliveros. 2008. Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits. pp. 167-174. En: World Congress on Engineering and Computer Science (ed.). Advances in electrical and electronics engineering-IAENG, Special Edition, California. p. 631-636.
- Roa, M., T. Oliveros, G. Álvarez, G. Ramírez, U. Sanz, H. Álvarez, A. Dávila, F. Zambrano, Q. Puerta y V. Rodríguez. 1999. Beneficio ecológico del café. Cenicafé, Chinchiná (Colombia). 273 p.
- Sandoval, Z.L. 2005. Caracterización y clasificación de café cereza usando visión artificial. Tesis de Magister en Automatización Industrial. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 111 p.
- Sandoval, Z. y F. Prieto. 2007. Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín 60(2): 4105-4127.
- Xing, J. and D. Guyer D. 2008. Comparison of transmittance and reflectance to detect insect infestation in Montmorency tart cherry. Computers and Electronics in Agriculture 64(2): 194-201.