

# EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL FRUTO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L. var. Colombia) DURANTE SU DESARROLLO Y MADURACIÓN

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF COFFEE FRUIT (*Coffea arabica* L. var. Colombia) DURING ITS DEVELOPMENT AND MATURATION

JOSÉ JAIME CARVAJAL HERRERA

*Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, jjcarvaj@unal.edu.co*

IVÁN DARÍO ARISTIZÁBAL TORRES

*Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, idaristi@unal.edu.co*

CARLOS EUGENIO OLIVEROS TASCÓN

*Ingeniero Agrícola, Ph.D., Cenicafé, Investigador principal, Carlos.oliveros@cafedecolombia.com*

Recibido para revisar Noviembre 20 de 2011, Aceptado Febrero 23 de 2012, versión final Marzo 20 de 2012

**RESUMEN:** La fuerza necesaria para desprender el fruto de *Coffea arabica* L, variedad Colombia, dimensiones ortogonales, diámetro característico, masa, contenido de humedad (b.h.), fuerza de fractura, firmeza, deformación y energía necesaria para alcanzar la ruptura de la cáscara del fruto fueron investigadas para nueve diferentes estados de desarrollo entre 182 y 238 días después de la antesis. Las propiedades mecánicas se evaluaron con un texturómetro en diferentes planos de aplicación de carga de compresión sobre el fruto utilizando dos diferentes aditamentos (puzón y placas paralelas). Los resultados obtenidos indican que las propiedades físicas y mecánicas dependen del estado de desarrollo del café y del plano de medición en el fruto. Las diferentes propiedades evaluadas podrían ser utilizadas para diseñar equipos para la recolección y para el procesamiento poscosecha, con mejor desempeño técnico.

**PALABRAS CLAVE:** *Coffea arabica* L. cv Colombia, fruto, propiedades físicas, propiedades mecánicas, maduración.

**ABSTRACT:** The detaching force, orthogonal dimensions, characteristic diameter, mass, moisture content (w.b.), fracture force, firmness, deformation and energy in the breaking point were investigated for nine different stages of development between 182 and 238 days after flowering, of fruits of *Coffea arabica* L, Colombia variety. The mechanical properties were evaluated at different levels of compression load on the fruit, using two different attachments (punch and parallel plates). The results indicate physical and mechanical properties depend on the stage of development and the measurement plane on the coffee fruit. The different properties obtained could be used to develop and improve equipment for harvesting and wet processing with better technical performance.

**KEYWORDS:** *Coffea arabica* L. cv Colombia, fruit, physical properties, mechanical properties, ripening.

### 1. INTRODUCCIÓN

El café es un grano muy consumido a nivel mundial, y es uno de los principales productos de exportación de varios países como Colombia. El café colombiano se distingue por su alta calidad física y en taza, valorada por consumidores en todo el mundo. Para ofrecer siempre este producto es necesario controlar rigurosamente cada una de las etapas del proceso, en el campo, el beneficio y en el secado. La fuerza que se necesita para desprender un fruto del árbol es

considerada una característica asociada al grado de maduración [1]. Ésta ha sido investigada por [1-5] encontrando que depende del estado de maduración. El conocimiento de las dimensiones ortogonales, firmeza, fuerza de fractura, deformación y energía requerida para alcanzar la ruptura del fruto es importante para el diseño de equipos para el despulpado, la clasificación y la separación de impurezas y de objetos extraños. En diferentes estados de maduración y ejes del fruto de café [6] midieron la fuerza de compresión, humedad y dimensiones, observando que el tamaño y la masa

de los frutos son similares y no fueron influenciados por el estado de madurez. En la referencias [7] y [8] se determinó fuerza de ruptura, firmeza, deformación y dimensiones de los frutos. Para algunos estados de desarrollo del fruto se han determinado propiedades físicas y mecánicas [3, 9-12] asociadas con la madurez y la calidad en taza del café [3]. El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar las principales propiedades físicas y mecánicas del fruto de café variedad Colombia durante su proceso de desarrollo y maduración.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología

Para el estudio se utilizó café variedad Colombia, sembrado a plena exposición, en la Subestación Experimental El Rosario de CENICAFÉ en Venecia-Antioquia (Colombia), a 1.630 msnm y con temperatura media de 20,1 °C. El cultivo fue establecido en mayo de 1999 con una distancia de siembra de 1 m x 1m y renovado por zoqueo en 2006. Cada árbol presentaba dos brotes de tres años de edad. Los frutos utilizados provenían de una marcación de la floración principal realizada el 18 de abril de 2009 [13]. Usando como referencia la escala de maduración de frutos utilizada por [3], se definieron 9 estados diferentes de desarrollo de los frutos (182, 189, 196, 203, 210, 217, 224, 231 y 238 días después de la antesis DDA) y se determinaron para cada estado de desarrollo varias propiedades físicas (dimensiones, masa, contenido de humedad en base húmeda) y mecánicas (fuerza de desprendimiento del fruto, firmeza, deformación, energía de fractura, y fuerza de fractura de la pulpa en diferentes planos de compresión).

### 2.2. Propiedades físicas y mecánicas

#### 2.2.1. Fuerza de desprendimiento

Se emplearon 100 frutos (repeticiones) por cada estado de desarrollo para determinar la fuerza de desprendimiento en la dirección del eje del pedúnculo utilizando un dinamómetro portátil digital con rango 0 a 200 N y resolución de 0,1 N (Figura 1) con el cual se registró la fuerza de tracción pura (Ft) requerida para su desprendimiento. Los frutos cosechados fueron llevados al laboratorio para determinar las demás propiedades.



Figura 1. Medición de la fuerza de desprendimiento

Para evaluar las dimensiones ortogonales y las propiedades mecánicas se definieron tres planos del fruto (Figura 2).

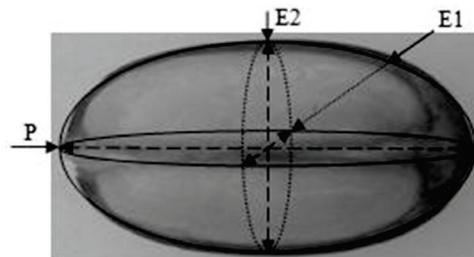


Figura 2. Planos y dimensiones E1, E2 y P de simetría del fruto de café cereza

#### 2.2.2 Dimensiones ortogonales

Utilizando un calibrador digital de resolución de 0,01 mm se midieron las tres longitudes principales E1, E2 y P en 100 frutos por cada estado de desarrollo. A partir de estas dimensiones se determinó el diámetro característico (Dc) utilizando las ecuaciones (1) a (4) citadas por [1, 14, 15]:

$$D1 = \frac{(E1 + E2 + P)}{3} \quad (1)$$

$$D2 = (E1 * E2 * P)^{(1/3)} \quad (2)$$

$$D3 = \left( \frac{(E1 * E2 + E1 * P + E2 * P)}{3} \right)^{(1/2)} \quad (3)$$

$$Dc = \frac{(D1 + D2 + D3)}{3} \quad (4)$$

### 2.2.3 Masa y contenido de humedad

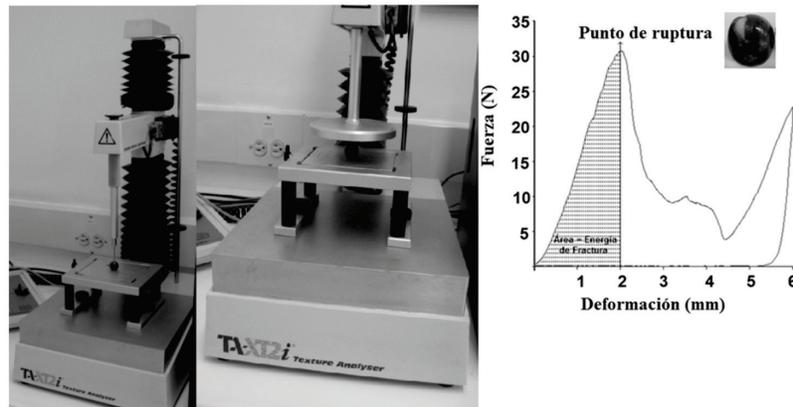
En los mismos frutos, con una balanza digital de 620 g de capacidad y resolución de 0,01 g, se registró la masa fresca ( $M$ ) y la masa seca ( $M_s$ ) del café cereza y se determinó el contenido de humedad  $M_c$  (%), en base húmeda (b.h), en estufa a 105°C durante 48 horas con la ecuación (5), empleando cinco repeticiones de 20 frutos.

$$M_c = \frac{(M - M_s)}{M} * 100 \quad (5)$$

### 2.2.4 Propiedades mecánicas

Para la medición de las propiedades mecánicas en los diferentes planos del fruto se empleó un texturómetro Stable Micro Systems®, modelo TA-XT2i, en modo de

compresión con una celda de carga de 50 kg, velocidad del bastidor de 1,7 mm.s<sup>-1</sup>, hasta una deformación de 6 mm del fruto. Los ensayos se realizaron con dos aditamentos (Figura 3) para aplicar la fuerza; punzón (Ø: 3 mm) y placas (Ø: 100 mm). Para cada uno de los 9 estados de desarrollo y en tres diferentes planos se hicieron 50 repeticiones utilizando un fruto diferente y desechándolo después de cada ensayo. La información registrada de fuerza (N) y deformación (mm) fue procesada usando el software “Texture Expert Exceed” del texturómetro. A partir de la curva de compresión registrada se determinó la fuerza de fractura, la deformación unitaria (deformación/dimensión del fruto), la energía de fractura (área sombreada bajo la curva, Figura 3) y la firmeza se determinó de acuerdo con [8], dividiendo la fuerza de fractura entre la deformación (punto de fractura de la pulpa).



**Figura 3.** Medición de propiedades mecánicas. De izquierda a derecha: texturómetro con punzón, con placas y curva de compresión registrada

### 2.2.5 Análisis estadístico

Para cada propiedad estudiada en los 9 diferentes estados de maduración se calculó: promedio, coeficiente de variación, análisis de varianza de una y dos vías, y se corrió la prueba de Duncan a un nivel de confianza del 95% para encontrar las diferencias múltiples en cada variable según los días de desarrollo del fruto (DDA) y el plano del fruto en algunas de las propiedades evaluadas (dimensiones, firmeza con punzón y con placas). En el caso de la fuerza de desprendimiento  $F_t$  se realizó además un análisis de regresión polinomial de esta variable con DDA.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Fuerza de desprendimiento

La fuerza  $F_t$  para desprender a tracción el fruto de café en cada estado de desarrollo se presenta en la Tabla 1 y en la Figura 4. Se observaron diferencias estadísticas en  $F_t$  entre los frutos sobremaduros (238 DDA) y los demás estados de desarrollo. Los valores promedios obtenidos en esta investigación son similares a los reportados por [1, 3] evaluados en café variedad Colombia, sin embargo contrario a lo hallado por [4] no se observó diferencia estadística entre los frutos verdes (182 y 189 días) y los estados pintón y maduro (224 y 231 días, respectivamente) indicando que se

requiere igual fuerza para desprender a tracción pura frutos en estos estados de desarrollo.

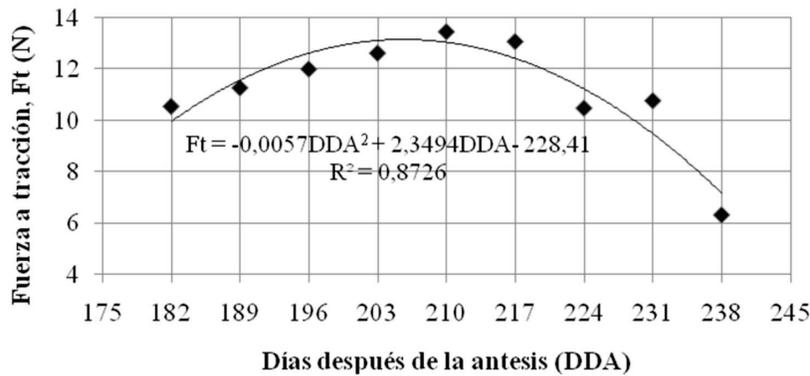
En la Figura 4 se observa que los datos de Ft respecto al tiempo de desarrollo y maduración del fruto se ajustaron bien a un modelo polinómico con un coeficiente de determinación de 0,8726, comportamiento similar al reportado por [3] para café variedad Colombia.

En la Tabla 2 se presentan las tres dimensiones ortogonales (E1, E2 y P) y el diámetro característico (Dc) del fruto de café con sus respectivos coeficientes de variación. En cada uno de los estados de desarrollo del fruto se encontraron diferencias estadísticas en las dimensiones E1, E2 y P.

**Tabla 1.** Fuerza de desprendimiento para cosechar el fruto de café

DDA	Estado	Tonalidad	Ft (N)	CV (%)
182	Inmaduro	Verde	10,55	b*
189	Inmaduro	Verde	11,27	bc
196	Inmaduro	Verde	12,00	cd
203	Inmaduro	Verde	12,62	de
210	Inmaduro	Verde	13,45	e
217	Inmaduro	Verde-amarillo	13,07	e
224	Pintón	verde-amarillo-naranja-rojiza	10,48	b
231	Maduro	Rojo	10,77	b
238	Sobremaduro	Rojo-violeta	6,33	a

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



**Figura 4.** Fuerza de desprendimiento Ft durante el desarrollo del café

**Tabla 2.** Dimensiones ortogonales E1, E2, P y diámetro característico (mm)

DDA	E1	CV (%)	E2	CV (%)	P	CV (%)	Dc	CV (%)
182	11,39 <sup>a*</sup>	ab <sup>**</sup>	4,76	12,68 <sup>b</sup>	ab	3,88	15,49 <sup>c</sup>	abc
189	11,22 <sup>a</sup>	a	4,73	12,56 <sup>b</sup>	a	4,63	15,32 <sup>c</sup>	a
196	11,47 <sup>a</sup>	b	4,73	12,74 <sup>b</sup>	ab	3,73	15,73 <sup>c</sup>	cd
203	11,41 <sup>a</sup>	ab	4,00	12,65 <sup>b</sup>	ab	3,73	15,64 <sup>c</sup>	abc
210	11,51 <sup>a</sup>	b	4,78	12,85 <sup>b</sup>	b	4,35	15,69 <sup>c</sup>	bcd
217	11,96 <sup>a</sup>	c	6,14	13,30 <sup>b</sup>	c	5,82	15,36 <sup>c</sup>	ab
224	12,46 <sup>a</sup>	d	4,87	14,37 <sup>b</sup>	d	6,28	15,57 <sup>c</sup>	abc
231	12,81 <sup>a</sup>	e	6,36	14,84 <sup>b</sup>	e	6,63	16,53 <sup>c</sup>	e
238	12,79 <sup>a</sup>	e	6,43	14,53 <sup>b</sup>	d	6,34	15,98 <sup>c</sup>	d

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

La dimensión mayor del fruto se presentó en el plano polar (P). Se hallaron diferencias estadísticas para los diámetros ecuatoriales E1 y E2 a partir de los 217 DDA (frutos de tonalidad verde-amarillo). Diferencias

estadísticas en el diámetro polar (P) se encontraron a partir de 231 días (frutos maduros). El diámetro característico (Dc) presentó diferencias a partir de 217 DDA.

Los valores promedios para Dc de los frutos pintones, maduros y sobremaduros son alrededor de 14 mm y para frutos verdes alrededor de 13 mm, y son valores muy similares a los encontrados por [1, 3, 12] en la escala de maduración definida por estos autores.

En la Tabla 3 se muestran los promedios de la masa fresca M (g), masa seca Ms (g) y el contenido de humedad en base húmeda Mc (%) para los diferentes estados de desarrollo del café en cereza.

**Tabla 3.** Masa fresca, masa seca y contenido de humedad (base húmeda) del fruto de café var. Colombia

DDA	M (g)	CV (%)	Ms (g)	CV (%)	Mc (%)	CV (%)			
182	1,32	a*	11,85	0,40	a	14,34	69,63	d	2,35
189	1,30	a	9,99	0,40	a	14,74	69,28	cd	1,30
196	1,37	ab	11,98	0,44	b	15,31	67,62	ab	0,85
203	1,37	ab	10,77	0,46	b	13,32	66,50	a	0,50
210	1,40	b	12,53	0,46	b	14,33	66,82	a	0,46
217	1,48	c	14,49	0,50	c	16,36	66,47	a	1,10
224	1,72	d	16,05	0,54	d	19,91	68,23	bc	2,44
231	1,94	f	19,96	0,58	e	19,19	70,34	d	0,93
238	1,80	e	18,07	0,61	f	18,83	66,33	a	2,09

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

**Tabla 4.** Firmeza (N/mm) con punzón y placas paralelas en diferentes planos del fruto de café

DDA	Con punzón					Con placas paralelas				
	E1	CV (%)	E2	CV (%)	P	CV (%)	E1	CV (%)	E2	CV (%)
182	51,35 <sup>a*</sup> c**	12,95	57,32 <sup>b</sup> bc	18,49	74,33 <sup>a*</sup> d	14,01	63,03 <sup>b</sup> d	13,33	52,31 <sup>c</sup> d	18,34
189	51,42 <sup>a</sup> c	17,47	60,56 <sup>b</sup> c	24,70	83,03 <sup>a</sup> e	11,32	65,28 <sup>b</sup> d	11,19	59,05 <sup>c</sup> ef	16,31
196	52,83 <sup>a</sup> cd	16,00	59,79 <sup>b</sup> c	28,32	83,80 <sup>a</sup> e	9,93	69,70 <sup>b</sup> e	9,49	58,24 <sup>c</sup> e	14,33
203	53,65 <sup>a</sup> cd	17,48	62,09 <sup>b</sup> c	27,80	89,92 <sup>a</sup> f	12,43	70,15 <sup>b</sup> e	8,98	63,14 <sup>c</sup> g	11,11
210	55,92 <sup>a</sup> d	14,32	72,42 <sup>b</sup> d	22,24	88,90 <sup>a</sup> f	12,63	73,09 <sup>b</sup> e	12,79	61,81 <sup>c</sup> fg	16,46
217	42,20 <sup>a</sup> b	37,35	52,45 <sup>b</sup> b	40,07	68,41 <sup>a</sup> c	26,94	62,54 <sup>a</sup> d	24,71	53,91 <sup>b</sup> d	25,10
224	8,73 <sup>a</sup> a	34,53	7,99 <sup>a</sup> a	43,10	26,20 <sup>a</sup> b	36,29	25,83 <sup>a</sup> c	31,43	22,89 <sup>b</sup> c	29,34
238	7,15 <sup>a</sup> a	20,63	5,28 <sup>b</sup> a	30,57	17,70 <sup>a</sup> a	39,25	16,26 <sup>a</sup> a	23,58	17,95 <sup>a</sup> ab	29,74

\*En una fila para la firmeza con punzón promedios con letra superíndice diferente presentan diferencia estadística según prueba de Duncan al 5%.

+En una fila para la firmeza con placas paralelas promedios con letra superíndice diferente presentan diferencia estadística según prueba de Duncan al 5%.

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

El contenido de humedad promedio para las diferentes etapas de maduración estuvo en el intervalo (66,33 a 70,34 % b.h.). Estos resultados difieren numéricamente de los encontrados por otros autores para el fruto Var. Colombia con una edad alrededor de 196 días, el cual presentó un contenido de humedad en base húmeda (%) alrededor de 68,2 % [9], y entre 69,35% y 70,59% durante las cuatro semanas siguientes de desarrollo [3], tal vez por diferencias en la metodología empleada y por características de los frutos evaluados en cada estudio.

Se encontró un comportamiento similar de la masa de los frutos al observado por [9, 11], donde ésta aumenta al transcurrir el tiempo, con valores promedios para M y Ms similares a los reportados por [1, 3, 12, 15, 16], entre los 203 y 238 DDA. En la masa fresca y seca se observaron diferencias estadísticas entre los estados de desarrollo a partir de 217 DDA.

En la Tabla 4 se presenta la firmeza evaluada con punzón y con placas paralelas en los frutos para los diferentes estados de desarrollo, excepto para 231 días (datos no registrados), en los planos ecuatoriales (E1 y E2) y en el plano polar (P).

Se presentaron diferencias estadísticas en la firmeza con punzón para cada estado de desarrollo entre los dos planos ecuatoriales E1 y E2 evaluados, excepto a los 224 días, y se presentaron diferencias estadísticas en esta propiedad tanto para el plano E1 como para el

plano E2 entre el grupo de frutos verdes (182 a 210 días), verde amarillo (217 días), y el grupo de frutos maduros (224 días) y sobremaduros (238 días).

La firmeza entre placas evaluada en la pulpa de los frutos para los diferentes estados de desarrollo presentó diferencias entre algunos planos en algunos de los estados de desarrollo de los frutos mientras en otros no. Los frutos verdes de 182 a 210 días presentaron diferencias en la firmeza en los tres planos para cada uno de estos estados de desarrollo. No se presentó diferencia de firmeza entre los dos planos ecuatoriales E1 y E2 a los 217, 224 y 238 días. La mayor firmeza la presentaron, en el plano ecuatorial E1, los frutos verdes a los 203 y 210 días de desarrollo. La menor firmeza del fruto se presentó a los 238 días (sobremaduros) sin diferencias estadísticas en los tres planos. El valor medio de firmeza obtenido, para los tres planos de aplicación del esfuerzo por compresión, varió; en los frutos verdes (182 a 217 días) de 52,31 a 89,92 N/mm, en los pintones (224 días) de 22,89 a 26,20 N/mm, en los maduros (231 días) de 21,28 a 25 N/mm y en los sobremaduros (238 días) de 16,26 a 17,95 N/mm.

Se puede observar que la firmeza aumenta en los verdes (182 a 210 días) y a partir ese momento decrece con los dos aditamentos (placas paralelas y punzón) y en cualquier posición del fruto. Este comportamiento de la firmeza concuerda con lo encontrado por los autores de la referencia [17] quienes detectaron en tres diferentes variedades de cerezas (*Prunus avium* L.) un aumento de la firmeza en el primer período de desarrollo seguido posteriormente por una disminución hasta alcanzar un valor mínimo constante. En la Figura 5 se presentan los valores medios de fuerza de fractura (N), deformación unitaria (%) y energía de fractura del fruto (N.mm) evaluados con dos aditamentos (punzón y placas) en diferentes planos de compresión E1, E2 y P.

La fuerza de fractura es un indicador de la resistencia a la compresión que ofrece el fruto. Esta propiedad mecánica medida con punzón para los planos (E1 y E2) presentó diferencias estadísticas entre los frutos verdes (182 a 210 días), los verde amarillos (217 días) y los pintones (224 días). La mayor resistencia a la compresión entre placas paralelas se presentó para la mayoría de estados de desarrollo en el plano ecuatorial E1, corroborando lo hallado en la referencia [6] para frutos verdes en dirección de su eje menor,

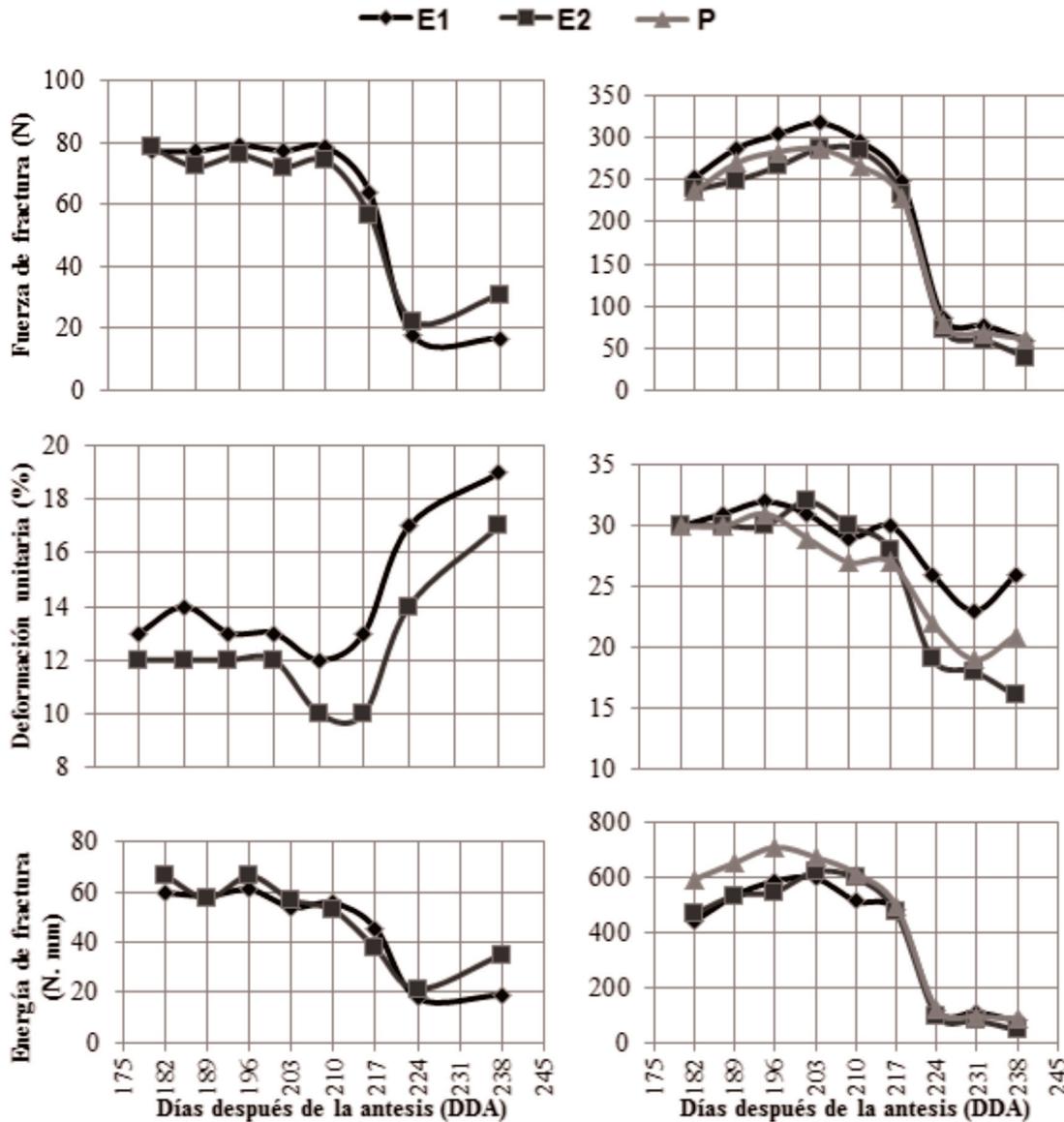
y la menor resistencia se observó en el plano E2. La mayor resistencia a la compresión en todos los planos la presentaron los frutos verdes (182 días a 217 días), seguido por los frutos pintones y maduros (224 días y 231 días) y la menor resistencia la presentaron los frutos sobremaduros (238 días). La fuerza de fractura hallada para frutos maduros (231 DDA) fue similar a los valores reportados por [7-8, 18]. La fuerza de fractura incrementó durante los estados inmaduros de desarrollo debido probablemente al endurecimiento de la semilla, luego decreció debido a que el fruto pasa a otra etapa de desarrollo donde se presenta formación de mucilago, aunque posiblemente la semilla continúe su endurecimiento hasta la senescencia del fruto. Este resultado corrobora lo propuesto por [9] sobre las etapas de la maduración del café donde se endurece la semilla, y lo encontrado por [17] para el caso de las cerezas (*Prunus avium* L.), y por [19] para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.).

El comportamiento de la deformación unitaria es dependiente del tipo de aditamento que comprime al fruto y del plano de aplicación de la fuerza. La deformación para alcanzar la fractura fue mayor utilizando el aditamento de placas paralelas comparado con el punzón cilíndrico de base plana. Se determinaron deformaciones que variaron entre el 10 y el 19 % (con punzón) y entre el 16 y el 32 % (con placas), resultados que son similares a lo encontrado por los autores de la referencia [7] quienes reportan para la deformación unitaria, con placas paralelas, valores entre 18 y 30 % para dos tipos de frutos verdes y para un tipo de fruto maduro.

Los valores absolutos de deformación alcanzada en el momento de la fractura de la pulpa del fruto, en los planos ecuatoriales (E1 y E2) con punzón, oscilaron entre 1,52 a 1,58 mm para frutos verdes y entre 1,95 a 2,43 mm para pintones y sobremaduros. Se observó que esta variable aumentó de verdes a maduros y sobremaduros, para ambos planos de aplicación del esfuerzo de compresión. Cuando se utilizaron placas paralelas, la deformación del fruto al presentarse la fractura de la pulpa fue mayor en los estados verdes y menor en los maduros y sobremaduros. Los valores absolutos de deformación variaron de 2,4 a 4,1 mm para los planos E1 y E2. En el plano polar P se presentó la mayor deformación 4,2 a 4,9 mm para frutos verdes y de 3,2 a 3,4 mm para los otros estados (pintón, maduro y sobremaduro).

La propiedad energía de fractura (N.mm) también depende del estado de desarrollo y del plano de compresión del fruto. Para alcanzar la fractura de la

pulpa, los frutos inmaduros necesitaron mayor energía comparado con los demás estados de maduración.



**Figura 5.** Propiedades mecánicas para diferentes estados de desarrollo del fruto de café en distintos planos (E1, E2 y P): con punzón (izquierda) y con placas paralelas (derecha)

Los valores promedios registrados cuando se utilizó punzón fueron de 17,7 a 35,1 N.mm para frutos maduros y sobremaduros, y de 37,5 a 66,5 N.mm para frutos verdes. Con placas paralelas los valores fueron de 78,7 a 122,2 N.mm para el grupo de maduros, pintones y sobremaduros, y de 440,7 a 711,1 N.mm para frutos verdes. En el plano polar P de los frutos verdes de 182 a 210 días se requirió mayor energía

para la ruptura (616,55 a 711,06 N.mm), mientras en el plano ecuatorial E2 se necesitó menor energía para los frutos de 224, 231 y 238 días (45,33 a 98,53 N.mm). La energía media para verdes (182 a 217 días) estuvo entre 440,66 N.mm (plano E1, fruto de 182 días) y 711,06 N.mm (plano P, fruto de 196 días). La energía media para el pintón, maduro y sobremaduro (224, 231 y 238 días, respectivamente) varió entre 122,19 N.mm (plano

P, fruto de 224 días) y 45,33 N.mm (plano E2, fruto de 238 días). La menor energía de fractura de los frutos pintones, maduros y sobremaduros podría utilizarse para el diseño de despulpadoras con materiales más económicos y con menor consumo energético.

#### 4. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y mecánicas son dependientes del estado de desarrollo y maduración del café y dependen del plano de medición en el fruto. La fuerza de tracción para el desprendimiento del café fue significativamente menor en los frutos sobremaduros. El diámetro característico basado en las tres dimensiones ortogonales del café permite diferenciar los frutos verdes, pintones, maduros y sobremaduros.

La firmeza y la fuerza de fractura del fruto aumentan a medida que el fruto verde se desarrolla y decrecen cuando el fruto está próximo a madurar. Este comportamiento es independiente del tipo de aditamento usado para aplicar la fuerza y de la dirección de compresión. La deformación del fruto hasta el punto de fractura de la pulpa durante la maduración del café varía de acuerdo al área de contacto según el tipo de aditamento utilizado (punzón o placas paralelas).

Las propiedades que permiten discriminar entre los frutos pintones (224 días) y maduros (231 días) fueron las dimensiones ortogonales y la masa fresca y seca.

Los frutos de café pintones, maduros y sobremaduros requieren menor energía para alcanzar la ruptura de la pulpa que los frutos verdes. El requerimiento de energía es mayor cuando el fruto es comprimido entre dos placas paralelas que cuando se utiliza un punzón.

Los resultados obtenidos en las diferentes propiedades evaluadas en este estudio podrían ser utilizados para desarrollar dispositivos para la cosecha y para diseñar tecnologías para el beneficio de mejor desempeño técnico y energético que las actuales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero dado por la DIME al proyecto con código 90302008, la colaboración de los Laboratorios de Procesos Agrícolas y Control de Calidad de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y

el apoyo técnico de CENICAFÉ.

#### REFERENCIAS

- [1] Álvarez, E., Álvarez, F., Oliveros, C.E. y Montoya, E.C., Propiedades físico-mecánicas del fruto y del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. Rev.Fac.Nal.Agr. Medellín., 52(2), pp. 701-720, 1999.
- [2] Álvarez, L.F., Cosecha mecánica de café en ladera. Chinchiná: Cenicafé. Disciplina de Ingeniería Agrícola, 1993.
- [3] Marín, S.M., Arcila, J., Montoya, E.C. y Oliveros, C.E., Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). Cenicafé, 54(3), pp. 208-225, 2003.
- [4] Sampaio, C. P., Correa, P. C., Queiroz, D. M. and Silva, J. N., Determinação da força requerida para o desprendimento de frutos de café em diferentes estádios de maturação. Revista Brasileira de Armazenamento, 25(2), pp. 52-56, 2001.
- [5] Wang, K. J., Mechanical coffee harvesting. Trans. of the ASAE., 28(3): pp. 400-405, 1965.
- [6] Chandrasekar, V. and Viswanathan, R., Physical and Thermal Properties of Coffee. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(3), pp. 227-234, 1999.
- [7] Couto, S.M., Batista, C., Devilla, A. E. and Epaim, V. T., Características de frutos de café sob compressão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(1), pp. 117-122, 2002.
- [8] Oliveros, C.E., Montoya, E.C. y Ayala, A., Efecto de la broca del café en la firmeza del grano en los estados de cereza, pergamino húmedo y pergamino seco. Cenicafé, 53(1), pp. 25-33, 2002.
- [9] Salazar, M.R., Chaves, B., Riaño, N., Arcila, J. y Jaramillo, A., Crecimiento del fruto de *Coffea arabica* L. var. Colombia. Cenicafé, 5(2), pp. 41-50, 1994.
- [10] Suárez, J.V., Influencia de la precipitación en el crecimiento del fruto de café. Avances Técnicos Cenicafé, (89), pp. 1-4, 1979.
- [11] Jaramillo, Á. y Arcila, J., Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de El Niño y su efecto en la caficultura. Avances Técnicos Cenicafé, No.390, 2009.

- [12] Montilla, P. J., Arcila, P. J., Aristizabal, L. M., Montoya, R. E., Puerta, Q., Oliveros, T., y Cadena, G., Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*, 59(2), pp. 120-142, 2008.
- [13] Carvajal, J.J., Evaluación cuantitativa del color del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) y su relación con algunas propiedades físico-mecánicas durante el proceso de maduración. [Trabajo de Grado Ingeniero Agrícola]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2010.
- [14] Aristizábal, I.D., Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para lavar y clasificar café fermentado. [Trabajo de Grado Ingeniero Agrícola]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1995.
- [15] Ciro, H.J., Oliveros, C.E. y Álvarez, F., Estudio dinámico bajo oscilación forzada del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín.*, 51(1), pp. 63-90, 1998.
- [16] Rendón, J.R., Arcila, P.J. y Montoya, E.C., Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Cenicafé*, 59(3), pp. 238-259, 2008.
- [17] Muskovics, G., Felföldi, J., Kovács, E., Perlaki, R. and Kállay, T., Changes in physical properties during fruit ripening of Hungarian sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars. *Post Harvest Biology and Technology*, 40, pp. 56-63, 2006.
- [18] Roa, G., Oliveros, C.E., Álvarez, J., Ramírez, C.A., Sanz, J.R., Álvarez, J.R., Dávila, M.T., Zambrano, D.A., Puerta, G.I. y Rodríguez, N., Beneficio ecológico del café. *Cenicafé*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná (Colombia), 1-273, 1999.
- [19] Ciro, H. J. y Osorio, J. A., Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombianas: resistencia mecánica para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *DYNA*, 75 (154), pp. 39-46, 2008.