

MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS PRODUCTIVAS DE ÁRBOLES DE CAFÉ

Gloria María Betancur-Arboleda*; Carlos Eugenio Oliveros-Tascón*; Esther Cecilia Montoya-Restrepo**

RESUMEN

BETANCUR A., G.M; OLIVEROS T., C.E.; MONTOYA R., E.C. Método fotogramétrico para la caracterización de estructuras productivas de árboles de café. Revista Cenicafé 62 (2): 90-99. 2011

Como el fin de obtener información de importancia en estudios de mejoramiento genético y para el diseño de dispositivos para la cosecha, se obtuvieron imágenes tridimensionales de árboles de café de la especie *Coffea arabica* L., empleando un método basado en la fotogrametría utilizando el programa PhotoModeler Professional®. El método se aplicó en 60 árboles de café con edades de 12 y 22 meses, en tres lotes, sembrados a 1,0 m x 1,0 m, 1,4 m x 1,0 m y 2,0 m x 1,0 m. En cada árbol, de cada lote, se midió la longitud de diez ramas previamente marcadas, utilizando el método basado en la fotogrametría (método 1) y con una cinta métrica (método 2). Los promedios de las diferencias relativas de la longitud de la rama obtenida con el método 1 con respecto al método 2, en los tres lotes, fueron 8,43%, 12,70% y 8,30%, respectivamente. Para obtener una mejor medición de la longitud de las ramas de árboles de café y facilitar la diferenciación de los nudos productivos se colocaron balotas de colores en las ramas, obteniendo un promedio de la diferencia de 5,4% con límites inferior y superior de 4,2% y 6,6%, respectivamente, para un coeficiente de confianza del 95%. La metodología utilizada permite generar imágenes tridimensionales de árboles de café a partir de las cuales se puede obtener información de importancia para estudios en cosecha manual y mecanizada y con fines agrícolas.

Palabras clave: Arquitectura de plantas, *Coffea arabica*, morfología, longitud de las ramas, nudos productivos.

ABSTRACT

In order to obtain important information on genetic improvement studies and to design devices for harvesting, tridimensional images of coffee trees of the *Coffea arabica* L. species were obtained using a method based on photogrammetry using the PhotoModeler Professional® software. The method was applied to 60 coffee trees with ages of 12 and 22 months in three plots, planted at 1.0m x 1.0m, 1.4m x 1.0 m and 2.0m x 1.0m. In each tree of each plot, the length of ten previously marked branches were measured using the photogrammetry-based method (Method 1) and a tape measure method (Method 2). Averages of the relative differences in the length of the branch obtained by using Method 1 with respect to Method 2, in the three plots, were 8.43%, 12.7% and 8.3% respectively. In order to get a better measurement of the length of the coffee tree branches and so as to facilitate the differentiation of productive nodes, colored ballots were placed in the branches, obtaining an average difference of 5.4 % with lower and upper limits of 4.2% and 6.6%, respectively, for a confidence coefficient of 95%. This methodology can generate tridimensional images of coffee trees from which important information for studies in manual and mechanized harvesting and agricultural purposes can be obtained.

Keywords: Plant architecture, *Coffea arabica*, morphology, length of branches, productive knots.

* Investigador Asociado (hasta el 2003) e Investigador Principal. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé.

** Investigador Científico III. Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El conocimiento de la arquitectura de las variedades de café cultivadas, para diferentes edades, sistemas de siembra y manejo, es un requerimiento importante en el diseño de dispositivos para la cosecha del café. En el diseño de equipos para asistir la cosecha manual se requiere información de la distancia entre las ramas y su distribución, el número de nudos y su distribución en las ramas, así como el número de frutos por nudo (11, 12, 13), para las variedades de café cultivadas en Colombia.

Para el diseño de equipos con aplicación de vibraciones o impactos al follaje o las ramas, además de las anteriores, también se requiere conocer propiedades mecánicas de las diferentes estructuras del árbol, como el tronco, las ramas y el pedúnculo (1, 2, 4, 5, 7). Factores como la altura de la planta (23), la masa de frutos maduros a recolectar (12, 22) y su distribución (10), también afectan el desempeño en cosecha manual y semi-mecanizada (5, 7, 11, 13, 15).

Entre los estudios adelantados en Cenicafe sobre morfología de la fructificación en el árbol de café se tienen los siguientes autores: Arcila (3) evaluó y graficó la distribución espacial de los frutos durante 3 años; Aristizábal *et al.* (5) determinaron las propiedades mecánicas y físicas del árbol de café requeridas para el diseño de equipos para la cosecha del café, con aplicación de vibraciones al tallo o a las ramas; y Salazar *et al.* (19) y Salazar (20) determinaron factores morfológicos relacionados con el rendimiento en la producción del árbol de café.

Los modelos morfológicos permiten definir la estructura de un individuo u objeto, y son utilizados con propósitos de investigación. En el caso de las plantas, los modelos morfogenéticos permiten analizar la estructura de la planta sin las alteraciones

provocadas por las condiciones externas, pues el fenotipo expresado será responsabilidad del genoma únicamente. En el caso de las plantas, se pretende generar individuos tridimensionales virtuales, que correspondan a la morfología de la especie. Adicionalmente, generar resultados sobre la descripción de la arquitectura acordes con la programación genética de la planta, en un ambiente biofísico conocido, no controlado.

Las plantas virtuales son imágenes computarizadas de la estructura y del crecimiento de plantas individuales en espacio tridimensional, que pueden servir para la posterior elaboración de un modelo de procesos (8, 16, 17, 18, 21). Estos modelos también permiten explorar la variación cuantitativa y cualitativa de una especie, tanto para investigación de los aspectos biofísicos como ecofisiológicos que dependan de la estructura de la planta.

La obtención de imágenes tridimensionales de plantas puede lograrse por diferentes métodos entre los cuales está la medición directa en el campo de las variables morfométricas, la aplicación de fotogrametría, la cual consiste en extraer información tridimensional del objetivo a través de fotografías tomadas desde varios ángulos, o la utilización de digitalizadores tridimensionales (8, 9). Algunos de estos sistemas son de uso limitado en la graficación de plantas, puesto que las hojas y ramas oscurecen u obstruyen la línea de observación a los puntos de especial interés (6).

Entre las herramientas existentes para el procesamiento de fotogramas con aplicación industrial existen programas computacionales especializados. Estos programas permiten capturar las imágenes con detalles y obtener información sobre estructuras de las plantas (6).

En esta investigación se evaluó un método para obtener imágenes tridimensionales de árboles de café que pueda ser utilizadas para obtener información de importancia en estudios de mejoramiento genético y para el diseño de dispositivos para la cosecha.

MATERIALES Y METODOS

Las pruebas de campo se llevaron a cabo en dos localidades: La Estación Central Naranjal, ubicada en el Municipio de Chinchiná (Caldas), y la Estación Experimental El Rosario, ubicada en el Municipio de Venecia (Antioquia). Se seleccionaron tres lotes, uno en Estación Naranjal y dos en la Estación El Rosario, con las características presentadas en la Tabla 1.

Las fotografías de los árboles de café se obtuvieron con una cámara digital KODAK DC 210 Plus, utilizando un fondo blanco y círculo blanco para la base del tallo, con cuatro marcas visibles. Para obtener imágenes tridimensionales de los árboles de café se utilizó el programa computacional PhotoModeler 4.0 Professional® de Eos Systems Inc (14). El principio utilizado para la obtención de imágenes tridimensionales del árbol de café, fue el fotogramétrico.

De cada lote, durante la recolección principal, se tomaron 20 árboles seleccionados aleatoriamente, y en cada uno de ellos, se marcaron diez ramas. En cada árbol se tomaron mínimo seis fotografías digitales, cubriendo completamente el dosel, cada una a 60°, en las cuales se buscó ubicar los nudos de la planta con frutos. Para facilitar la visualización de las estructuras en la fotografía fue necesario defoliar todo el árbol.

De la imagen obtenida para cada árbol seleccionado se determinó la longitud de diez ramas, previamente marcadas e identificadas en las fotografías (método 1). Posteriormente, a cada una de estas ramas se les midió la longitud con una cinta métrica (método 2).

El procedimiento del método 1 fue el siguiente: Se organizaron las fotografías virtuales en carpetas, teniendo en cuenta su orden, lote y árbol. Luego, se procesaron las fotografías con el programa computacional PhotoModeler Pro 4.0®, y se obtuvieron los gráficos virtuales tridimensionales, uno por cada árbol, para adquirir los datos virtuales de cada árbol. Finalmente se exportaron los gráficos obtenidos en PhotoModeler pro 4.0® al programa AUTOCAD 14, para su procesamiento y análisis de los resultados.

Tabla 1. Características de los lotes evaluados.

Característica	Estación Central Naranjal	Estación Experimental El Rosario	
	Lote Naranjal	Lote 1	Lote 2
Árboles	20	20	20
Distancia de siembra	2,0 m x 1,0 m	1,4 m x 1,0 m	1,0 m x 1,0 m
Plantas por sitio	1	2	1
Edad	22 meses	12 meses	12 meses
Variedad	Colombia	Colombia	Colombia
Pendiente	15%	66%	72%
Tallo	Plantilla	Plantilla	Plantilla

Para la aplicación del método 1, una vez defoliado el árbol, se colocaron balotas de colores en los nudos con frutos, con el fin de mejorar la imagen virtual.

El análisis consistió en primer lugar en hacer una descripción de la información obtenida con el método 1; y posteriormente, en establecer la diferencia relativa en la medición de la longitud de las ramas con el método 1 respecto al método 2, tanto a nivel de cada lote, e independientemente del lote.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las fotografías procesadas (método 1), con los puntos clave marcados en cada rama, para uno de los 20 árboles utilizados, se presentan en la Figura 1. Las imágenes tridimensionales obtenidas de árboles de café (Figura 2), permiten hacer algunas observaciones de las estructuras vegetativas de un árbol de café, tales como la ubicación espacial tridimensional de cada punto, línea y curva presentes en el gráfico; además permite hacer mediciones



Figura 1. Fotografías procesadas para la elaboración del gráfico tridimensional.

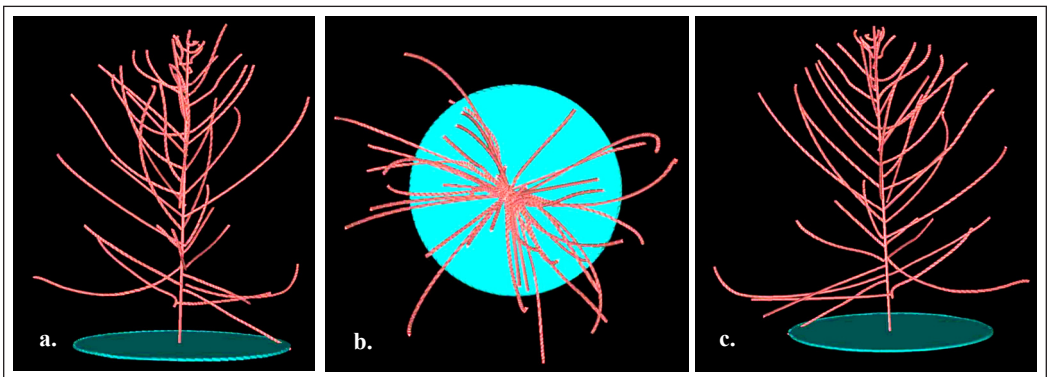


Figura 2. Gráficos tridimensionales del árbol de café. **a, b y c.** Vistas desde diferentes planos.

de distancias entre puntos y dar textura a las superficies

La facilidad para diferenciar los nudos varió de acuerdo al lote (Figura 3). El lote 1 de la Estación El Rosario fue el que más dificultades presentó para su graficación, debido a factores como el entrelazamiento de las ramas en cafetales con dos plantas por sitio y la alta densidad de siembra, que no permitieron diferenciar adecuadamente las ramas en las fotografías.

En el Lote 2 se presentaron dificultades para diferenciar los nudos, principalmente por la presencia de entrenudos cortos.

En el Lote de la Estación Central Naranjal se presentaron las condiciones más favorables para la graficación, por la menor densidad de siembra que en los lotes anteriores, árboles con entrenudos más largos, menor presencia de follaje y pendiente menor.

A partir de las imágenes tridimensionales de árboles de café obtenidas con el método 1 puede describirse la ramificación, pero no la

longitud, con una exactitud aceptable (diferencia relativa inferior al 100%). Para lograrlo, y adicionalmente mejorar la localización de los nudos con frutos, se colocaron balotas de colores en las ramas (Figura 4), obteniendo las imágenes presentadas en la Figura 5 y los resultados presentados en la Tabla 2 en un árbol de café variedad Colombia, de 30 meses de edad, sembrado con distancia de siembra de 1,5 m x 2,0 m.

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 2, con el método 1 modificado puede describirse con exactitud la distribución de las ramas primarias, las ramas con frutos y el número de nudos presentes. Al momento de la evaluación, se observó que el tercio medio es el que posee, descriptivamente, mayor cantidad de ramas primarias, ramas con frutos y nudos con frutos. En el tercio inferior se encuentra el 33% de las ramas, el 27,8% de las ramas productivas y el 30,4% de los frutos. En los tercios medio e inferior se encuentra el 79,6% de la producción de café del árbol, de acuerdo con los resultados obtenidos en la validación de la metodología modificada.

Tabla 2. Distribución de las ramas primarias, con frutos y nudos, en los tercios del árbol obtenida con el método 1 modificado.

Estructura	Tercio del árbol								
	Inferior			Medio			Superior		
	Real	Estimado	Diferencia	Real	Estimado	Diferencia	Real	Estimado	Diferencia
Ramas Primarias									
Número	20,0	20,0	0,0	22,0	22,0	0,0	18,0	18,0	0,0
Porcentaje	33,3	33,3	0,0	36,7	36,7	0,0	30,0	30,0	0,0
Ramas con frutos									
Número	10,0	10,0	0,0	17,0	17,0	0,0	9,0	9,0	0,0
Porcentaje	27,8	27,8	0,0	47,2	47,2	0,0	15,0	15,0	0,0
Nudos									
Número	76,0	76,0	0,0	123,0	123,0	0,0	51,0	51,0	0,0
Porcentaje	30,4	30,4	0,0	49,2	49,2	0,0	20,4	20,4	0,0

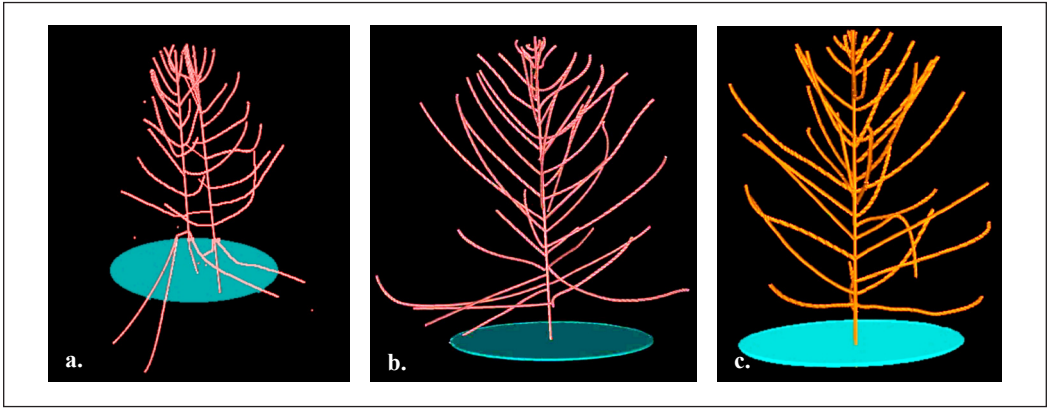


Figura 3. Figuras en 3D, de árboles representativos en cada lote. **a.** Lote 1 en la Estación El Rosario; **b.** Lote 2 en la Estación El Rosario; **c.** Lote Estación Central Naranjal.



Figura 4. Árboles de café con balotas de colores en las ramas.

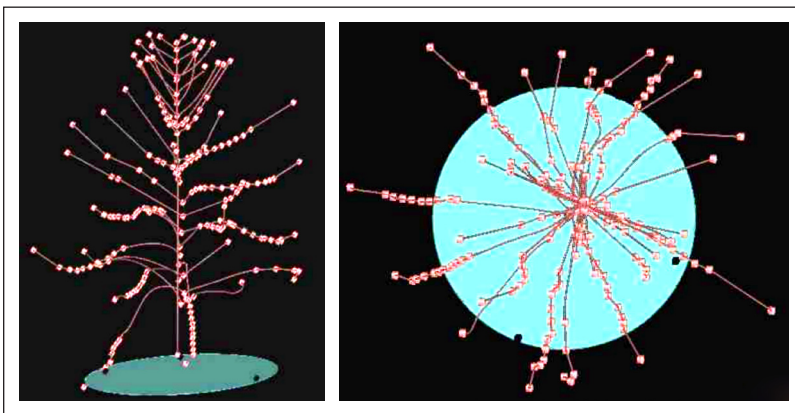


Figura 5. Vistas frontal y en planta de un árbol de café, obtenidas con el método modificado.

En la Tabla 3 se presentan valores medios de la longitud de las ramas de café por árbol, con cada uno de los métodos y la diferencia relativa entre éstos. De igual manera, por lote - árbol, se presenta la media y su intervalo con un coeficiente de confianza del 95%. Para el lote en la Estación Central Naranjal, las diferencias relativas presentaron un valor promedio de 8,26% con un intervalo de 3,86% y 12,66%, para un coeficiente de

confianza del 95%. En el lote 1 de la Estación Experimental El Rosario, el promedio de la diferencia relativa fue 8,43%, con intervalo de 4,71% y 12,14%, y 12,68% en el lote 2 con intervalo de 9,16% y 16,20%, para un coeficiente de confianza del 95%.

La diferencia relativa promedio entre los dos métodos es igual estadísticamente, en los tres lotes evaluados, según prueba

Tabla 3. Longitud media por rama - árbol, obtenida con los dos métodos y la diferencia relativa por árbol.

Árbol	Estación Experimental El Rosario						Estación Central Naranjal		
	Lote 1			Lote 2			Método 1 cm	Método 2 cm	Diferencia relativa, %, (valor absoluto)
	Método 1 cm	Método 2 cm	Diferencia relativa, %, (valor absoluto)	Método 1 cm	Método 2 cm	Diferencia relativa, %, (valor absoluto)			
1	51,50	53,95	4,54	67,15	62,60	7,27	46,05	47,44	2,92
2	54,80	56,30	2,66	55,64	53,55	3,90	67,80	71,40	5,04
3	37,00	44,35	16,57	50,42	45,50	10,81	62,80	58,75	6,89
4	24,90	32,10	22,43	56,61	59,90	5,49	58,90	64,90	9,24
5	33,80	47,75	29,21	56,28	49,95	12,67	59,90	65,60	8,69
6	45,30	50,55	10,39	47,37	50,00	5,26	76,10	74,40	2,28
7	41,10	43,75	6,06	61,41	53,55	14,68	81,70	85,45	4,39
8	42,90	48,40	11,36	67,60	53,35	26,71	79,11	78,56	0,71
9	57,10	59,10	3,38	55,66	54,45	2,22	65,70	56,40	16,49
10	40,10	47,40	15,40	63,73	51,25	24,35	66,30	71,90	7,79
11	51,63	53,20	2,95	62,78	55,30	13,53	68,11	78,44	13,17
12	42,40	41,60	1,92	56,32	52,95	6,36	76,20	72,45	5,18
13	45,60	49,75	8,34	57,46	48,65	18,11	67,20	75,55	11,05
14	56,10	56,05	0,09	58,30	49,95	16,72	66,20	64,95	1,92
15	42,50	44,85	5,24	53,70	44,85	19,73	74,60	69,95	6,65
16	45,10	45,84	1,61	58,18	45,85	26,89	37,60	67,50	44,30
17	48,10	57,75	16,71	61,48	57,80	6,37	47,90	49,90	4,01
18	62,10	63,25	1,82	72,31	63,25	14,32	67,70	74,40	9,01
19	48,90	48,10	1,66	53,12	48,10	10,44	77,50	80,05	3,19
20	51,80	48,75	6,26	52,51	48,75	7,71	80,22	82,11	2,30
Promedio			8,43			12,68			8,26
Límite inferior, 95%			4,72			9,16			3,86
Límite superior, 95%			12,14			16,20			12,66
D.E.			7,93			7,52			9,40

D.E.: Desviación estándar

t, al 5%. En general, independientemente del lote, la diferencia absoluta relativa entre los dos métodos es del 5,4%, con límites inferior y superior de 4,2% y 6,61%, respectivamente, con un coeficiente de confianza del 95%. El 66% de los árboles presenta una diferencia relativa menor del 10% (Figura 6).

En la Figura 6 se presenta la frecuencia acumulada para las diferencias relativas obtenidas en los tres lotes. El promedio de la diferencia relativa fue de 9,79%, con intervalo de 7,61% y 11,97%, con un coeficiente de confianza del 95%.

Finalmente, puede concluirse que la fotogrametría con el empleo de un programa para el procesamiento de las imágenes (Photo

Modeler Pro 4.0), es una herramienta que permite en forma ágil, generar imágenes tridimensionales de árboles de café, a partir de las cuales puede obtenerse información morfológica de importancia para estudios en cosecha manual y mecanizada, y con fines agronómicos. Para obtener mejores resultados se requiere defoliar los árboles y colocar balotas de colores en las ramas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al personal de la Estación Central Naranjal y de la Estación Experimental El Rosario por el apoyo para las mediciones de campo, también al personal científico de la disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé.

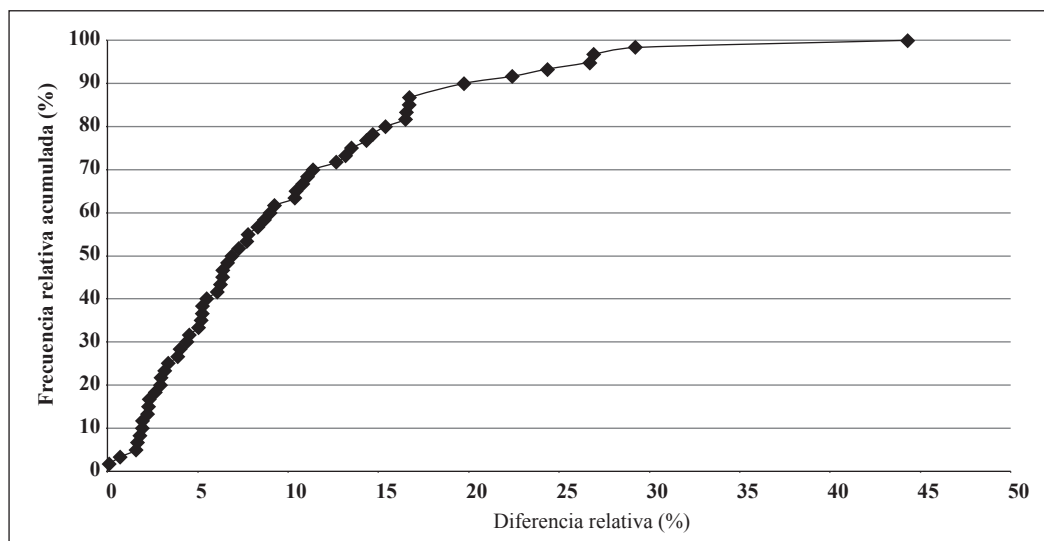


Figura 6. Frecuencia acumulada para la diferencia relativa de longitud de ramas de café reales y obtenidas (estimadas) con la metodología modificada en el campo.

LITERATURA CITADA

1. ÁLVAREZ M., F. Cosechador de café por vibración del follaje "COVAUTO". p. 50-75. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades 1999. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 92 p.
2. ÁLVAREZ T., E.; ÁLVAREZ M., F.; OLIVEROS T., C.E.; MONTOYA R., E.C. Propiedades físico-mecánicas del fruto de café y del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia. Revista facultad nacional de agronomía Medellín 52(2):701-732.1999.
3. ARCILA P., J. Foliage development and production of the coffee plant. En: Colloque scientifique international sur le café. (14 : 2-6 1990 : San Francisco). San Francisco : ASIC, 1990. 5 p.
4. ARISTIZÁBAL T., I.D.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ M., F. Evaluación del principio de vibración lateral en múltiples puntos del follaje para la cosecha mecanizada de café. Revista facultad nacional de agronomía Medellín 56(1):1849-1864. 2003.
5. ARISTIZÁBAL T., I.D. Physical and mechanical properties of the coffee tree related to harvest mechanization. Transactions of the ASAE 46(2):197-204. 2003.
6. BETANCUR A., G.M. Estudio sobre la distribución espacial de la fructificación en el árbol de café *Coffea arabica* L.V. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agrarias, 2001. 124 p. Tesis: Ingeniera agrónoma.
7. DIAZ G., D.; RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; MORENO C., E.L. Cosecha de café con el equipo STIHL SP-81 de actuadores oscilantes. Cenicafé 60(1):41-57. 2009.
8. GODIN, C.; COSTES, E.; SINOQUET, H.A. A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry. Annals of botany 84:343-357. 1999.
9. HONGCHUN, Q.; LINQIN, C.; ZHONGHUA, L.; YOU LAN, W. Automatic extraction of ramification pattern for living plants: A review. Scientific research and essays 5(23):3550-3563. 2010.
10. ISAZA G., L.E.; MONTOYAR., E.C.; VÉLEZ Z., J.C.; OLIVEROS T., C.E. Evaluación de la concentración de los frutos maduros de café empleando técnicas no selectivas de recolección manual. Cenicafé 57(4):254-287. 2006.
11. LONDOÑO, H.D.; OLIVEROS T., C.E.; MORENO S., M.A. Desarrollo de una herramienta manual para asistir la recolección de café en Colombia. Cenicafé 53(2):93-105. 2002.
12. LÓPEZ F., H.A.; OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A. Disminución del costo unitario de la cosecha de café con el empleo de un método de recolección manual asistido. Cenicafé 57(4):262-273. 2006.
13. OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; BUENAVENTURA A., J.D.; SANZ U., J.R. Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual de café. Cenicafé 56(1):37-49. 2005.
14. PHOTOMODELER®. [En línea]. Vancouver : Eos Systems, (s.f.). Disponible en internet: <http://www.photomodeler.com>. Consultado en Diciembre de 2011.
15. RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; ACOSTA A., R.; BUENAVENTURA A., J.D. Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café: Descafé. Cenicafé 57(2):122-131. 2006.
16. REFFYE, PH. DE. Simulation de la croissance de cinq cultivars (*Coffea arabica* L.) par l'analyse des cimes. Café cacao thé 35(3):177-190. 1991.
17. REFFYE, PH. DE.; SNOECK, J.; JAEGER, M. Modélisation et simulation de la croissance et de l'a architecture du caféier. p. 523-546. En: Colloque scientifique international sur le café. (13 : Agosto 21-25 1989 : Paipa). Paipa : ASIC, 1989. 24 p.
18. RHINOCEROS. [En línea]. Seattle : McNeel North America, (s.f.). Disponible en internet: <http://www.rhino3d.com>. Consultado en Diciembre 27 de 2011.
19. SALAZAR A., J.N.; OROZCO C., F.J.; CLAVIJO P., J.F. Características morfológicas, productivas y componentes del rendimiento de dos variables de café: Colombia y Caturra. Cenicafé 39(2):43-60. 1988.
20. SALAZAR A., N.J. Análisis de factores morfológicos relacionados con la producción en cinco variedades de café de porte bajo. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agrarias, 1988. 98 p. Tesis: Magíster scientiae en ingeniería agronómica.
21. SNOECK, D. Simulation de la croissance de cinq cultivars *Coffea arabica* L. par l'analyse des cimes. Café cacao thé 35(3):177-190. 1991.

22. VÉLEZ Z., J.C.; MONTOYA R., E.C.; OLIVEROS T., C.E. Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 91 p. (Boletín Técnico No. 21).
23. VILLEGAS B., M.J.; MONTOYA R., E.C.; VÉLEZ Z., J.C.; OLIVEROS T., C.E. Desempeño de los recolectores de café según la altura de la plantación. Cenicafé 56(1):19-36. 2005.