

VARIABLES AGRONÓMICAS DETERMINANTES DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE CAFÉ EN FINCAS DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS¹

Humberto Araque Salazar*, Hernando Duque Orrego**

ARAQUE S., H.; DUQUE O., H. Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de Caldas. Revista Cenicafé 70(1):81-92. 2019

El presente estudio analizó las variables agronómicas determinantes en la producción del cultivo de café, que pueden ser intervenidas por los productores y que contribuyen a mejorar la productividad del cultivo. La investigación se desarrolló en fincas cafeteras del Departamento de Caldas que hicieron parte del programa de Gestión Empresarial del Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, durante el año 2013. Se construyó una función de producción tipo Cobb–Douglas que permitió visualizar el peso de las variables agronómicas en la explicación de la productividad del cultivo; cinco de las variables estudiadas resultaron significativas por su efecto en las variaciones en la productividad del cultivo, siendo la más importante la densidad de siembra, expresada en número de árboles de café por hectárea cultivada. El trabajo aporta información de campo que permite ilustrar a los productores sobre el impacto que tienen las decisiones técnicas en la productividad en el largo plazo y a los extensionistas para fortalecer la transferencia de tecnología.

Palabras clave: Función de producción, densidad de siembra.

AGRONOMIC VARIABLES THAT DETERMINE THE PRODUCTIVITY OF COFFEE CROPS IN FARMS OF THE CALDAS DEPARTMENT

This study analyzed the agronomic variables that determine the productivity of coffee crops, which could be managed by coffee producers in order to increase crop productivity. This research was conducted at coffee farms in the Caldas Department that were part of the enterprise management program of the Committee of Coffee Growers of Caldas, during the year 2013. A modified Cobb–Douglas type production function was used because it allows to visualize the influence of the agronomic variables in the explanation of the crop productivity process. Five of the studied variables had significant influence because of their effect in the crop productivity variations; the most important was sowing density, expressed in number of coffee trees per planted hectare. The field work provides information that allows to explain to coffee producers the impact of technical decisions on productivity in the long term; it also allows to show such factor to extension agents in order to strengthen the technology transfer strategy of the growers.

Keywords: Production function, sowing density.

¹ Tesis de Grado para optar el título de Maestría en Administración. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

*Coordinador Programa, Comité Departamental de Cafeteros de Caldas.

**Gerente Técnico, Federación Nacional de Cafeteros–FNC.

La caficultura en Colombia se desenvuelve en un contexto de fuertes fluctuaciones en el precio del café, afectando negativamente a los productores y las zonas cafeteras. La caficultura es el principal renglón agrícola que soporta el ingreso para 560 mil productores, cuyas familias están constituidas por cerca de 2,7 millones de personas, ubicadas en 20 de los 32 departamentos del país (Ureña, 2013). La importancia social y económica que aún mantiene la caficultura en el país genera la necesidad de desarrollar estrategias para que las familias puedan ejercer su actividad económica de manera satisfactoria.

El precio de venta del café en Colombia lo determinan tres elementos: precio del café en la bolsa de Nueva York (Contrato C)², la prima de calidad que se paga al café colombiano y la tasa de cambio vigente. El precio de los fertilizantes, que es el agroinsumo principal, está atado a la cotización internacional de la urea, el potasio y el fósforo (FNC, 2014). Un productor de café no tiene posibilidad de intervenir en los elementos de la formación del precio, por lo cual, para mejorar su utilidad solo puede actuar en lograr una mejor productividad y en la optimización de los insumos de producción.

En el mundo agrícola se utilizan, indistintamente, los términos “productividad” y “rendimiento” para indicar las unidades de peso que se producen por hectárea, esta medición depende de tres factores: la fertilidad del suelo, la adaptación genética de la planta a las condiciones del clima o los suelos, y el impacto de la tecnología empleada (Machado, 2009). En un sentido amplio, la productividad se define comúnmente como una relación de una medida de volumen de producción a una medida de volumen de uso de insumos (Global Strategy, 2017). En su nivel más básico, la

productividad mide la cantidad producida por una unidad agrícola, dado un conjunto de recursos e insumos.

La búsqueda de la mayor productividad en la agricultura es una vía correcta, pues la productividad y la competitividad están estrechamente relacionadas: una mayor productividad puede conducir a una mayor competitividad de la unidad de producción, porque se produce más a partir de casi la misma cantidad de recursos. Esto significa que, con todo lo demás igual, el costo de producción por unidad de producción es menor, y los márgenes por unidad producida tenderán a ser mayores (Global Strategy, 2017).

Los factores que definen la producción agrícola son complejos de medir, especialmente los vinculados con la interacción “planta-medio ambiente” (Arcila, 2007), los cuales el productor no está en capacidad de modificar; sin embargo, los relacionados con las tecnologías de producción pueden ser intervenidos por el productor y, por lo tanto, pueden ser objeto de estudio para encontrar sus relaciones con la productividad.

Para estudiar estas relaciones se utilizan funciones de producción. De acuerdo con Patil (2012), la función de producción es una relación tecnológica que muestra, para un estado de conocimiento tecnológico, cuánto puede producirse con unas cantidades dadas de insumos. En este sentido la función expresa la relación tecnológica, factores y productor. En la agricultura la producción es la función de la tierra, el trabajo, el capital, la organización y la tecnología, entre otros.

Duque (2001) realizó un análisis económico de algunas prácticas y tecnologías

² Contrato C, determina las reglas, para trazar los cafés arábicos lavados, o cafés suaves como el que produce Colombia.

recomendadas por Cenicafé para el manejo del cultivo del café, las prácticas escogidas fueron consideradas clave, por el papel que desempeñan en: reducción de costos de producción, mejoramiento de la productividad, aumento de los ingresos de las fincas cafeteras, así como preservación de la calidad del café. Este estudio buscó difundir las ventajas de las tecnologías estudiadas presentando su viabilidad técnica y económica, con el objetivo de mejorar el desempeño económico de las fincas cafeteras, elevar su competitividad y contribuir al desarrollo rural de región cafetera.

Duque y Bustamante (2002) utilizando una función de producción tipo Cobb-Douglas, estudiaron variables asociadas a la producción de café, las cuales se agruparon en tres categorías: variables para describir las condiciones de producción de las fincas, variables para la descripción socioeconómica de los productores y variables relacionadas con los aspectos económicos y financieros de las fincas estudiadas. Es este estudio se construyeron tres modelos econométricos partiendo de la función tipo Cobb-Douglas, los cuales buscaban explicar las variaciones en la productividad del factor tierra, los costos unitarios de producción y el margen bruto por hectárea.

El modelo que explicó la productividad del factor tierra incluyó siete variables que resultaron significativas, disponibilidad de capital de trabajo, hectáreas cultivadas en café, edad promedio de los lotes, densidad de siembra promedio, mano de obra (jornales/ha), kilogramos de fertilizante aplicados por hectárea y porcentaje de la finca sembrada en café; la mayor respuesta en términos de

productividad por hectárea se relacionó con la densidad de siembra.

Para el presente estudio las variables seleccionadas con el fin de analizar su aporte a la explicación del fenómeno de la productividad del cultivo de café, fueron las de tipo tecnológico asociado al cultivo³. Se escogieron teniendo en cuenta tres criterios: que aparecieran en las investigaciones previas, específicamente las reportadas por, Leibovich y Barón (1996), Duque y Bustamante (2002) y Perdomo y Mendieta (2007); que hicieran parte de los avances tecnológicos para el cultivo de café generados por Cenicafé; que pudieran ser objeto de intervención por parte del agricultor, de tal manera que la información generada y los elementos encontrados en la investigación pudieran ser de utilidad para los caficultores participantes.

Con el objetivo de identificar el aporte de cada una de las variables tecnológicas al fenómeno de la productividad del cultivo de café, en este estudio se construyó una función de producción que relacionó la productividad del cultivo de café medida (@ año⁻¹ de c.p.s.) y las variables tecnológicas del sistema de producción, para lo cual se utilizó una función Tipo Cobb-Douglas.

De acuerdo con Debertin (1986), la función tipo Cobb-Douglas ha sido utilizada virtualmente para cualquier proceso de producción que involucre la transformación de insumos en productos, en la producción agrícola. Recientemente, Ghoshal y Goswani (2017), utilizaron esta función para analizar la eficiencia en la producción de arroz, en diferentes regiones de la India.

³ Se excluyeron de análisis del proceso de producción de café, las tareas de cosecha y postcosecha, por la dificultad para la recolección de la información en campo, que implicaría un tiempo muy largo de dedicación a esta labor por parte de los técnicos del Servicio de Extensión quienes son los encargados de la recolección de la información, haciendo inviable la realización del estudio.

Igualmente, Malacarne *et al.* (2017) estudiaron, bajo los criterios de la investigación de innovación inducida de Hayami y Ruttan, e incluyeron 129 países y para un marco de tiempo a 50 años, y explicaron el proceso de producción utilizando la función tipo Cobb-Douglas. Pudo probarse aún más las implicaciones del cambio técnico en la productividad de las variables: trabajo, tierra, fertilizantes y capital.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el departamento de Caldas (Colombia), que está conformado por 27 municipios, de los cuales 25 derivan su economía de la producción de café (Figura 1).

En el estudio participaron caficultores de 22 de los 25 municipios cafeteros (Tabla 1),

destacándose que los tres municipios faltantes son los que tienen menores áreas cultivadas en café en el departamento.

Se estudiaron los cultivos de café de 336 fincas cafeteras, correspondientes al año 2013 (enero 1 a 31 diciembre), incluidas en el programa de Gestión Empresarial del Comité Departamental de Cafeteros de Caldas y que registraron costos en la herramienta “mis costos en la Web”⁴ u otros aplicativos, pero que en todos los casos utilizaron la misma captura de información y estructura de costos de producción.

Los caficultores de Caldas tomaron parte en este programa de manera voluntaria, digitando directamente la información en la herramienta (previa capacitación por parte del Servicio de

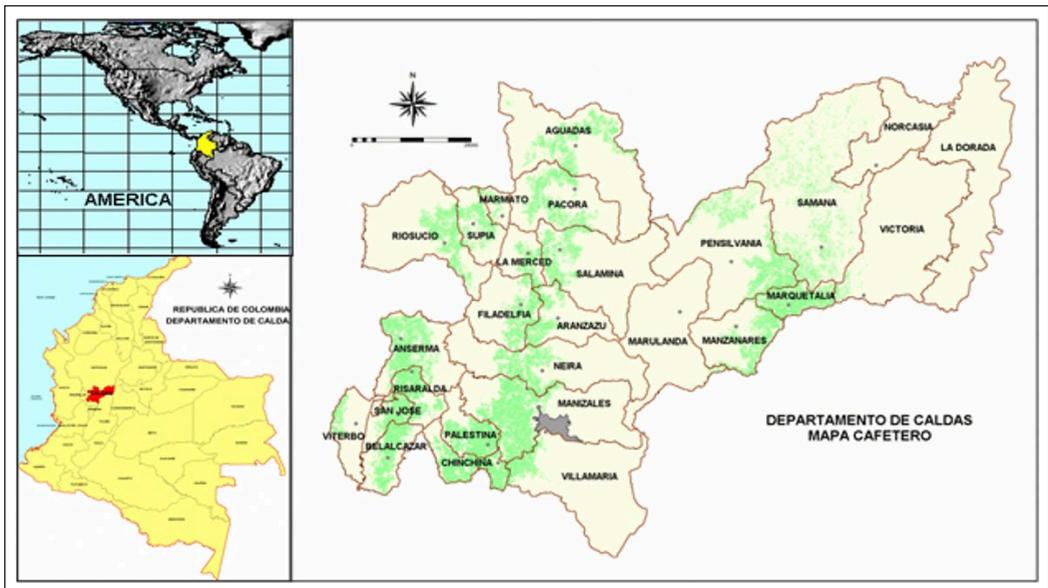


Figura 1. Zona donde se realizó el estudio.

⁴ El programa mis costos en la Web fue desarrollado por el Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, y lo pone a disposición de los caficultores del departamento, para que registren sus costos. Algunos caficultores registran costos en herramientas distintas, pero los entregan al Comité para su consolidación.

Extensión del Comité de Cafeteros de Caldas), por lo cual su distribución no obedece a alguna regla específica, cualquier productor puede solicitar ingreso al programa. Por lo anterior, para este estudio las 336 fincas cafeteras no se considerarán como una muestra aleatoria y, por lo tanto, los resultados obtenidos representan únicamente la dinámica de esta población.

Tabla 1. Fincas participantes por municipio.

Municipio	No. de fincas
Aguadas	14
Anserma	16
Aranzazu	4
Belalcázar	5
Chinchiná	52
Filadelfia	5
La Merced	1
Manizales	56
Manzanares	12
Marquetalia	12
Neira	11
Pácora	17
Palestina	59
Pensilvania	7
Riosucio	9
Risaralda	21
Salamina	8
Samaná	5
San José	8
Supía	7
Villamaría	5
Viterbo	2
Total	336

La información económica y tecnológica se tomó de dos fuentes:

a) Sistema de información cafetera SICA,⁵ para las variables asociadas al componente tecnológico de la producción de café.

b) Base de datos consolidada por el Comité Departamental de Cafeteros, de las 336 fincas del programa mis costos en la Web y otros aplicativos que utilizan la misma estructura de costos, para las variables del componente económico de la producción de café.

Variables de respuesta

Las variables tecnológicas escogidas para estudiar el sistema de producción fueron: edad de los cafetales (años), densidad de los cafetales (plantas/hectárea), porcentaje del área cultivada en variedades resistentes a la roya (porcentaje), porcentaje del área cultivada en variedades susceptibles a la roya (porcentaje) y fertilización por hectárea (kg ha⁻¹ de fertilizante).

Construcción de la función de producción

Se construyó una función de producción que relacionó la productividad del cultivo de café medida como arrobas⁶ por año de café pergamino seco (@ año⁻¹ de c.p.s) y las variables tecnológicas del sistema de producción, para lo cual se utilizó una función Tipo Cobb-Douglas (Ecuación <1>).

$$Y_t = AKt^\alpha Lt^\beta \quad 0 < \alpha, \beta < 1 \quad <1>$$

⁵ Sistema de información geográfico de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, que permite georeferenciar las fincas cafeteras y la información de su caficultura, es actualizado por el Servicio de Extensión de la Federación de Cafeteros.

⁶ Una arroba de café pergamino seco, equivale a 12,5 kg.

Donde:

Y_t : producción

A : progreso técnico exógeno (constante de la función)

Kt : stock de capital (capital)

Lt : número de empleados en una economía (mano de obra)

α y β : representan las elasticidades parciales de las variables capital y mano de obra (Schotter,1996).

En el caso de la función tipo Cobb-Douglas, la suma de las elasticidades parciales pueden alcanzar un valor diferente a la unidad y por ello permite el ingreso de un mayor número de variables a la función.

Al ser una función exponencial, para linealizarla se tomaron logaritmos naturales en ambos lados de la ecuación, para transformarla en una función doble logarítmica (Debertin, 1986), la cual es lineal en sus parámetros. Para uso econométrico se incluyó el término e , el cual representó el error de la función; la expresión de la función que se utilizó para construir los modelos se representa en la Ecuación <2>.

$$\ln(Y) = \ln A + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) \dots + \beta_n \ln(X_n) + e \quad \langle 2 \rangle$$

Donde:

Y : productividad

X_n : variables tecnológicas

β : elasticidades parciales de variables

Para estimar los parámetros β se usó el método de regresión lineal, se empleó

el programa estadístico (SAS), como lo propone Olva (2009). En el análisis se consideraron para ser incluidas en el modelo, aquellas variables que presentaron un nivel de significancia menor o igual al 15%, por tratarse de un estudio de campo y con énfasis en caficultura comercial, que es ampliamente heterogénea. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los conceptos de heterocedasticidad, autocorrelación y multicolinealidad.

Una de las características destacables de la función transformada, es que permite conocer con facilidad las elasticidades parciales de cada variable (parámetros β). Esto significa que a mayor valor de un parámetro β , mayor elasticidad parcial y, por lo tanto, variaciones porcentuales en el valor de la variable tendrán mayor peso en la determinación en la productividad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se resalta la heterogeneidad en los tamaños de los predios participantes en el estudio, pues varió entre 0,33 hectáreas el de menor tamaño y 161 hectáreas para el de mayor tamaño.

En cuanto a la cantidad de fertilizante aplicada fue en promedio de 987,71 kg ha⁻¹ de fertilizante, con un coeficiente de variación de 43,37%, mediana de 941,61 kg ha⁻¹ de fertilizante, encontrándose que el 25% de las fincas aplican menos de 679,74 kg ha⁻¹ de fertilizante; en la Tabla 2 se presenta el análisis de los percentiles. Para cafetales en producción, Valencia (1992) en el Avance Técnico No.175 de Cenicafé sobre fertilización de cafetales, menciona que la dosis anual con fertilizantes simples es 1.000 kg ha⁻¹ y 1.400 kg ha⁻¹ con compuestos, los valores encontrados pueden indicar que se estuviera realizando una fertilización inadecuada (subfertilizando).

Tabla 2. Valor de los cuartiles para niveles de fertilización

Análisis de cuartiles para la fertilización (kg ha⁻¹ de fertilizante)	
Cuartil estimado	Valor
Min	171,828
Q1	679,74
Q2	941,617
Q3	1.300
Max	2.240

El porcentaje promedio de fincas sembradas con áreas en variedades resistentes a la roya del café fue del 83,46%, con un coeficiente de variación del 31,14%. De acuerdo con la información consignada en la Tabla 3, se indica que el 50% de las fincas tenían la totalidad de su área sembrada en variedades resistentes a la roya del café. El porcentaje promedio de fincas sembradas únicamente con variedades susceptibles a la roya fue del 16,53%.

Tabla 3. Valor de los cuartiles para porcentaje de variedad resistente

Análisis de cuartiles para porcentaje variedad resistente	
Cuartil estimado	Valor
Min	0
Q1	0,7731
Q2	1
Q3	1
Max	1

De estudios previos como el realizado por Duque (2005), se ha encontrado que la edad de los cafetales es una de las variables más importantes en determinar la productividad del cultivo. La edad promedio encontrada para la población de este estudio fue de 3,71 años, que es muy baja comparada con el promedio nacional, que para el momento del estudio estaba en 7,09 años. El coeficiente de variación fue del 40,43%. Al analizar los cuartiles que se presentan en la Tabla 4, se destaca que

75% de las fincas estudiadas tienen cafetales menores de 4,2 años.

Tabla 4. Cuartiles para la variable edad promedio de los cultivos.

Análisis de cuartiles para edad del cafetal (años)	
Cuartil estimado	Valor
Min	0,7
Q1	2,9
Q2	3,4
Q3	4,2
Max	16,66

La densidad de siembra del cultivo (expresada en el número de árboles de café sembrados en una hectárea de terreno), al igual que la edad, es considerada de gran importancia para la productividad del cultivo de café. La densidad promedio de las fincas del estudio fue de 6.643 árboles/ha, que es alta comparada con las 5.196 del resto del país, y corresponde a un avance de la región hacia las densidades óptimas (por encima de 7.000 plantas/ha), con un coeficiente de variación de 20,58%. La Tabla 5 muestra que únicamente 25% de la población tiene densidades inferiores a 5.622 árboles/ha.

Tabla 5. Cuartiles para la variable densidad de siembra.

Análisis de cuartiles para densidad de siembra (árboles/ha)	
Cuartil estimado	Valor
Min	3.830
Q1	5.622
Q2	6.517,5
Q3	7.559
Max	9.988

Modelo de productividad del cultivo de café

La variable de respuesta elegida para el modelo fue la productividad promedio por hectárea

de cada finca, definida como la producción de café expresada en arrobas de café pergamino seco. A partir del procedimiento utilizado se obtuvo un modelo en función de cinco variables que resultaron significativas (P valor $< 0,15$).

El modelo fue significativo (P valor $< 0,0000$) y presentó un R^2 de 0,497. Lo anterior indica que este modelo explica hasta el 49,7% de las variaciones en la productividad promedio por hectárea de las fincas, en función de las variaciones en las variables. En la Tabla 6 se presentan los valores de los parámetros β encontrados para las variables que resultaron significativas en el modelo.

Es importante destacar que el modelo no incluyó, como se mencionó anteriormente, por su dificultad o imposibilidad de ser intervenidas por los productores cafeteros, los aspectos biofísicos como clima y suelo, entre otros, y que por ser un proceso productivo agrícola deben tener impacto en la productividad.

Los coeficientes beta establecidos, corresponden a la elasticidad parcial de cada variable. Las máximas elasticidades parciales correspondieron a las variables: densidad del cafetal árboles/ha (1,03) y nivel de fertilización–kg ha-año⁻¹ de fertilizante (0,515), las dos con

coeficiente positivo, lo cual indica que estas variables son las que tienen mayor peso en la determinación de la productividad.

El estudio previo elaborado por Duque y Bustamante (2002), coincide con el resultado encontrado en el presente modelo, donde la densidad (árboles/ha) es la variable con mayor influencia en la productividad del café (mayor elasticidad parcial), elemento preponderante en los sistemas de producción de café y, por consiguiente, debe ser tenida en cuenta en las estrategias y programas para elevar la productividad del cultivo.

El modelo elaborado interrelaciona las variables tecnológicas, indicando qué variables resultan significativas y muestra la importancia y el peso de cada una de ellas en la explicación del fenómeno de la productividad, pero es importante tener en cuenta que se trata de un fenómeno biológico y como tal tiene restricciones.

A continuación, se analizan cada una de las variables que se incluyen en el modelo.

Densidad. Se entiende por densidad del cultivo de café, el número de árboles sembrados por unidad de área (árboles/ha), en el modelo

Tabla 6. Parámetros estimados para el modelo de productividad del cultivo de café.

Variable	Unidad medida variable	Nomenclatura para el modelo	Parámetro estimado	Error	t	$Pr>t$
		Intercepto	-7,853	1,294	-6,07	0,00000
Área en levante	Hectárea	alev	-0,072	0,0225	-3,214	0,00000
Edad del cafetal	Año	edad	0,0994	0,0744	1,336	0,00140
Nivel de fertilización	kg ha-año ⁻¹ de fertilizante	fert_ha	0,515	0,0517	9,967	0,01400
Porcentaje de variedad resistente	Porcentaje	Por_res	0,0309	0,055	0,0557	0,01500
Densidad del cafetal	Árboles/ha	dens	1,03	0,145	7,162	

se identifica que la mayor elasticidad parcial es la de esta variable, implica que, al aumentar porcentualmente la densidad de siembra, se logran los mayores aumentos porcentuales en la productividad.

Para el caso de la densidad se han realizado estudios que han permitido establecer la respuesta en productividad a densidad de siembra en Colombia. Duque (2005) reporta la Ecuación <3>.

$$Y=130,73 + 0,052647X - 0,000002359X^2 \quad <3>$$

Donde:

Y: producción en arrobas/ha

X: número plantas/ha

Esta función es de tipo cuadrático y se caracteriza por ser marginal decreciente, por lo tanto, al aumentar la densidad de siembra a partir de 2.500 árboles/ha hasta un poco más de 10.000 árboles, la productividad se incrementa, pero en forma decreciente, para luego comenzar a disminuir. Por lo tanto, la respuesta es no lineal y la respuesta llega a un punto en el cual se torna decreciente, como se mencionó anteriormente. Utilizando esta función se estimó el óptimo biológico y económico para la variable densidad de siembra, encontrando el óptimo biológico alrededor de 11.000 plantas/ha y el óptimo económico entre 9.400-9.800 plantas/ha (Arcila, 2007).

Es importante destacar que, aunque el modelo encontró la variable densidad como la más influyente en la productividad, esta tiene un límite biológico y económico, en consecuencia, los aumentos que se logren en densidad, que contribuyan a alcanzar los niveles óptimos, serán beneficios para la productividad, lo contrario la afectaría negativamente. Estos óptimos también están

sujetos a las condiciones ambientales y de manejo donde se encuentre el cultivo.

Edad. La variable edad de la plantación, medida en años, presenta una elasticidad parcial positiva, mostrando que tiene influencia directa en la productividad, lo que indicaría que aumentos porcentuales en la edad se reflejarían en aumentos porcentuales en la productividad. Para entender el impacto de esta variable se debe complementar la información obtenida en el modelo con las conclusiones de los estudios realizados por Mestre *et al.* (1994), quienes encontraron que la respuesta en productividad de acuerdo a la edad de la plantación se explica mediante funciones cuadráticas, que son además marginales decrecientes (Duque, 2001).

Lo anterior significa que durante el ciclo productivo se incrementa la producción, pero en forma decreciente, hasta alcanzar un máximo y luego comienza a disminuir. Duque en 2005, con información obtenida por Uribe (1965), en ocho cosechas y tres densidades de siembra, encontró el punto específico para cada densidad, en el cual el promedio de la producción era máximo, el punto varía para cada densidad de población. Para mantener altas productividades es necesario evitar la prolongación del ciclo del cultivo excesivamente, las plantaciones deben ser renovadas en el momento oportuno, según su densidad de siembra.

Área en levante. La variable área en levante, la cual corresponde a las áreas que están sembradas, pero no han entrado en producción, en general menores de 24 meses de edad, porque han sido renovadas, presentan un coeficiente con signo negativo, lo cual indica que, si las áreas en levante aumentan, la productividad total de la finca disminuye.

Para que una finca pueda mantener equilibrio técnico y económico en su sistema productivo,

y a la vez se evite el envejecimiento de sus plantaciones, debe existir un equilibrio entre el área en levante y área en producción. Arcila (2007), basado en los trabajos de Mestre y Ospina (1994), recomienda dividir el número total de plantas en grupos de igual tamaño según las características del cultivo (zona, densidad, luminosidad, etc), y cada año debe renovarse uno de ellos, las áreas correspondientes a este grupo de plantas son las áreas en levante.

Cuando no se cumple esta regla y se renueva un mayor número de plantas, se afectará negativamente la productividad, tal como lo indica el signo del coeficiente en el modelo; por el contrario, si no se realiza el proceso de renovación se envejecerá la plantación afectando negativamente la productividad.

Porcentaje de variedades resistentes. Esta variable mide la proporción del área en café sembrado con variedades resistentes a la roya, el modelo muestra un coeficiente con signo positivo, indicado que si se aumenta el porcentaje de variedades resistentes se tendrá un aumento porcentual en la productividad; el máximo aumento se daría cuando la totalidad del área se encuentre sembrada con variedades resistentes.

Lo anterior es concordante con estudios realizados sobre el impacto de la enfermedad de la roya del cafeto en la producción; se encontró que en ausencia de medidas de control, se presentaban reducciones hasta del 23,0% de la producción acumulada en un ciclo de cinco años (cuatro cosechas), pero también puede afectar la conversión de café cereza a pergamino seco (Rivillas *et al.*, 1999).

Niveles de fertilización. Esta variable, medida en kg ha^{-1} de fertilizante, mostró un coeficiente con un valor de 0,515, el segundo más alto después de la densidad y con valor positivo, indicando que si se dan aumentos

porcentuales en los niveles de fertilización se tendrá un aumento porcentual mayor en la productividad.

El crecimiento y el desarrollo de los cafetales y, por ende, su producción y rentabilidad, dependen en buena medida de una adecuada nutrición, la cual se logra cuando la planta dispone de cantidades suficientes y balanceadas de todos los nutrientes requeridos; adicionalmente, los cultivos correctamente alimentados ofrecen una mejor calidad del grano y son más resistentes a plagas, enfermedades, sequías y otras condiciones adversas (Sadeghian, 2013).

En promedio, la producción de café puede disminuir en más de 40,0% cuando no se realiza la labor de la fertilización (Sadeghian, 2010), valor concordante con el resultado obtenido por el modelo. Sin embargo, es necesario tener presente que, en los trabajos realizados sobre fertilización se ha encontrado respuesta positiva en producción hasta cierto límite, Duque (2005) para un estudio en el departamento del Quindío, afirma que la aplicación de nitrógeno se ajusta a una función polinomial del segundo grado (cuadrática) que es marginal decreciente.

El análisis de esta función contribuyó a concluir que para la aplicación de fertilizante existe un valor óptimo, por lo cual los aumentos en fertilización afectan positivamente la productividad, como lo sugiere el modelo, hasta que se alcance el valor óptimo; valores superiores no tendrán efecto y generan sobrecostos.

La herramienta técnica para hacer un adecuado manejo de la fertilización es el análisis de suelos, que conduce a la aplicación ajustada de los elementos deficientes en el suelo y contribuye a la racionalización de los insumos y reducción del costo de producción (Sadeghian, 2013).

El estudio realizado permite concluir que con el método de la función de producción se actualizó la información relacionada con la productividad del café en el departamento de Caldas. Los resultados obtenidos pueden redundar en recomendaciones prácticas para los productores del departamento, pero también de otras regiones cafeteras del país, en un sentido general, que les permita aumentar la productividad. De acuerdo con los resultados encontrados, se presentan las siguientes consideraciones finales:

El modelo encontrado para la productividad relaciona cinco variables que resultaron significativas: el área en levante medido en hectáreas, la edad de los cafetales medida en años, la densidad del cultivo medida en árboles/hectárea, porcentaje de área sembrado en variedades resistentes medido en porcentaje, nivel de fertilización medido en kilogramos fertilizante por hectárea al año.

El modelo de productividad del cultivo de café encontrado, explica el 49,7% de las variaciones en la productividad, resultado positivo, teniendo en cuenta que la información obedece a un ejercicio real de los caficultores participantes, en el marco de condiciones comerciales de producción de café. El modelo no contempló las variables ambientales que interactúan con la productividad del cultivo.

La variable que más aporta a la productividad por hectárea es la densidad de siembra (árboles/hectárea), que presentó la mayor elasticidad parcial y con signo positivo; este resultado concuerda con el modelo previo elaborado por Duque y Bustamante (2002).

La densidad de siembra puede ser intervenida por el productor. Sin embargo, el mejor momento para cambiar esta variable es durante las renovaciones por siembra o zoca del cultivo o en las siembras nuevas de

café. Teniendo en cuenta esta característica, los productores deben abordar el manejo de esta variable como de tipo estratégico para su empresa cafetera, y lo deben hacer con una visión de largo plazo, para evitar impactos negativos en la productividad.

La segunda variable con mayor aporte a la productividad es la fertilización. Esta variable tiene una característica destacable, que está relacionada con el hecho de que el productor la puede intervenir de manera inmediata, adoptando las recomendaciones técnicas de fertilización, generadas por la investigación y transferidas por el servicio de extensión rural; aunque la respuesta puede ser lenta, como ocurre con la corrección de la acidez.

El modelo también encontró a la variable edad del cafetal como significativa en la explicación de la productividad, presentado una elasticidad parcial con signo positivo; esta variable puede ser intervenida de manera inmediata para mejorar la productividad. Para la decisión del grado de intervención sobre esta variable debe tenerse en cuenta el impacto sobre las áreas en levante, las cuales en el modelo presentan elasticidad parcial con signo negativo, indicando que si aumentan reducen la productividad.

El modelo confirma las bondades de establecer variedades resistentes a la roya del café, la cual presenta elasticidad parcial con signo positivo, lo que indica que su incremento aporta al aumento de la productividad. Debido a que esta variable, al igual que la densidad de siembra, sólo puede intervenir en el momento de las renovaciones por siembra, es clave que se considere como una variable crítica para el éxito del negocio cafetero.

Debido a que las variables encontradas como significativas, por ejemplo, la variedad, no pueden modificarse en largos periodos de

tiempo, se requiere que el productor tenga un alto nivel de información y comprensión de las implicaciones sobre la productividad y, por lo tanto, sobre la rentabilidad del negocio. Lo anterior requiere que el productor evalúe las consecuencias en el largo plazo de las intervenciones que se realicen o dejen de realizarse sobre estas variables y su relación con la productividad y rentabilidad de la finca.

Las variables densidad y edad, al relacionarse con la productividad y vistas de manera independiente, tienen un comportamiento cuadrático y son marginales decrecientes. En este sentido, cualquier simulación que se haga con el modelo, debe respetar el rango de las variables, para la función encontrada.

LITERATURA CITADA

- Arcila, J. (2007). Factores que determinan la productividad del cafetal. En H.F. Ospina (Ed). *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp.60-86). Chinchiná: Cenicafé.
- Debertin, D.L. (1986) *Agricultural production economics*. New York: University of Kentucky.
- Duque O., H. (2001). *Análisis económico de doce prácticas para mejorar el desempeño de las fincas cafeteras*. Chinchiná: Cenicafé.
- Duque O., H. (2005). *Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera*. Chinchiná: Cenicafé.
- Duque O., H., y Bustamante, F. (2002). *Determinantes de la productividad del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2014). *Comportamiento de la industria cafetera colombiana*. Bogotá: FNC.
- Ghoshal, P. y Goswami, B. (2017) Cobb-Douglas production function for measuring efficiency in Indian agriculture: a region-wise analysis. *Economic Affairs*, 62(4), 573-579.
- Global Strategy. (2017). *Productivity and efficiency measurement in agriculture: literature review and gaps analysis*. (Technical Report Series GO-19-2017). Roma: GSARS.
- Leibovich, J. y Barón, C. (1996). *Determinantes de la productividad cafetera en finca*. Santafé de Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico CEDE.
- Machado A., C. (2009a). El rezago productivo de la agricultura venezolana. *Debates IESA*, 14(3), 69-73.
- Machado A., C. (2009b). *Políticas públicas y desarrollo tecnológico agrícola en Venezuela*. En Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. No. 17 (p. 103-182). Caracas: Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.
- Malacarne, J.H., Artz, G.M. y Orazem, P. (2017). *Agricultural production and technical change around the world, 1961-2010*. (Economics Working Paper 17024). Ames, IA: Iowa State University, Department of Economics.
- Mestre M., A., y Ospina O., H.F. (1994). *Estabilización de la producción en fincas cafeteras*. (Avance Técnico No. 200). Manizales: Cenicafé.
- Olva, H. (2009). *Análisis de la función de producción cobb-douglas y su aplicación en el sector productivo mexicano* (Tesis pregrado para optar al título de licenciado en estadística) Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Patil, A.K. (2012). *Agricultural Production and Productivity*. Karad, India: Sadguru Gadage Maharat College.
- Perdomo, J.A., y Mendieta, J.C. (2007). Factores que afectan la eficiencia técnica y asignativa en el sector cafetero colombiano: una aplicación con análisis envolvente de datos. *Desarrollo y Sociedad*, 60, 1-45.
- Rivillas O., C.A., Leguizamón C., J.E., y Gil V., L.F. (1999). *Recomendaciones para el manejo de la roya del café en Colombia*. (Boletín Técnico No. 19). Manizales: Cenicafé.
- Sadeghian K., S. (2010). *Fertilización: una práctica que determina la producción de los cafetales*. (Avance Técnico No. 391). Manizales: Cenicafé.
- Sadeghian K., S. (2013). Nutrición de cafetales. En F. Gast (Ed). *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Vol. 2 (p 85-115). Chinchiná. Cenicafé.
- Schotter, A. (1996). *Microeconomía*. México: Editorial continental S.A.
- Urueña G., M. (2013). El mercado mundial y nacional del café en el siglo XXI. En *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. Vol. 1 (p.18-25). Chinchiná: Cenicafé.
- Valencia A., G. (1992). *Fertilización de los cafetales*. (Avance Técnico No. 175). Manizales: Cenicafé.