



# ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR EN CAFÉ VARIEDAD CASTILLO CON MEDIDAS LINEALES Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO

*Estimation of the leaf area in Castillo variety coffee with linear  
measurements and its relationship with yield*

 **Tulio Cesar Lagos Burbano**<sup>1</sup>  
E-mail: [tlagos3@gmail.com](mailto:tlagos3@gmail.com)

 **Jorge Fernando Navia Estrada**<sup>2\*</sup>  
E-mail: [jornavia@yahoo.com](mailto:jornavia@yahoo.com)

 **Silvana Lizeth Riascos Arcos**<sup>3</sup>  
E-mail: [liz.silis93@hotmail.com](mailto:liz.silis93@hotmail.com)

 **Danita Andrade Díaz**<sup>4</sup>  
E-mail: [danitaan@gmail.com](mailto:danitaan@gmail.com)

<sup>1</sup>Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.

<sup>2</sup>Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.

<sup>3</sup>Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos, Universidad de Nariño

<sup>4</sup>Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos, Universidad de Nariño (UDENAR) Ciudadela  
Universitaria Torobajo, 520008, Pasto, Nariño, Colombia.

Fecha recepción: 15 de diciembre de 2021 / Fecha Aprobación: 27 de diciembre 2021 / Fecha Publicación: 30 de enero 2022

## RESUMEN

El café es un producto agrícola de importancia socioeconómica en Colombia por su potencial exportador y características especiales que lo clasifica en los primeros puestos de países productores; actualmente, existe poca información sobre estudios del área foliar que permitan predecir el rendimiento; por ello, se busca obtener un modelo lineal para calcular el área foliar y estimar el rendimiento a partir de variables relacionadas. Este trabajo se realizó en el departamento de Nariño en los municipios de La Unión en coordenadas 77°07' 38"LO y 1°34' 23"LN, Sandoná a 77°44' 54"LO y 1°10' 25"LN, Consacá a 77°25' 56"LO y 1°10' 30"LN y La Florida en 77°17' 56"LO y 1°22' 06"LN, a cuatro niveles de sombrero. Se evaluó el largo, ancho y peso de hoja para obtener un modelo lineal de cálculo de área foliar donde se alcanzó un ajuste del 91,7%. Posteriormente, bajo un diseño de BCA se evaluó la altura de planta-AP, diámetro de tallo-DT, número de hojas-NH, número de ramas primarias-NRP, área foliar-AF, índice de área foliar-IAF, número de frutos-NFPP, peso promedio de fruto-PPF, café pergamino seco-CPS y rendimiento por planta-RPLAN. Se realizó un ANDEVA mostrando que no hubo efecto del sombrero sobre las variables; el análisis de correlación indicó que NH y IAF tienen importancia en el rendimiento y con el análisis de regresión lineal se obtuvo un modelo de estimación del rendimiento con las variables NH, AF, NFPP, PPF y CPS de un ajuste del 99,5%.

## Palabras claves.

Regresión lineal, correlación, medidas alométricas, ramas y hojas.

## Cómo citar:

Lagos Burbano, T.C.; Navia Estrada, J.F.; Riascos Arcos, S. L. y Andrade Díaz, D. (2022). Estimación del área foliar en café variedad castillo con medidas lineales y su relación con el rendimiento. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias -FAGROPEC*. Universidad de la Amazonia. Vol. 14 (1), 9-24. <https://doi.org/10.47847/fagropec.v14n1a1>



Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons (CC BY 4.0).

## ABSTRACT

Coffee is an agricultural product of significant socioeconomic importance in Colombia due to its export potential and unique characteristics, which rank it among the top coffee-producing countries; currently, there is little information available on studies of leaf area that can be used to predict yield; therefore, the aim is to develop a linear model to calculate leaf area and estimate yield based on related variables. This study was conducted in the department of Nariño in the municipalities of La Unión at coordinates 77°07' 38"W and 1°34' 23"N, Sandóna at 77°44' 54"W and 1°10' 25"N, Consacá at 77°25' 56"W and 1°10' 30"N, and La Florida at 77°17' 56"W and 1°22' 06"N, at four levels of shading. Leaf length, width, and weight were evaluated to obtain a linear model for calculating leaf area, achieving a 91.7% fit. Subsequently, under a BCA design, plant height (AP), stem diameter (DT), number of leaves (NH), number of primary branches (NRP), leaf area (AF), leaf area index (IAF), number of fruits (NFPP), average fruit weight (PPF), dried parchment coffee (CPS), and yield per plant (RPLAN) were evaluated. An ANDEVA analysis was performed, showing that shading had no effect on the variables; the correlation analysis indicated that NH and IAF are important for yield, and the linear regression analysis yielded a yield estimation model using the variables NH, AF, NFPP, PPF, and CPS with a 99.5% fit.

## INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica*) es considerado el motor económico de muchos países localizados en las zonas tropicales del mundo, y representa el segundo producto más comercializado a nivel mundial, después del petróleo (Figuerola-Hernández et al., 2015). La producción de café en Colombia para el año 2019 cerró en 14,8 millones de sacos de 60 kilos, un 9% más que en el 2018, lo cual no se había presentado desde 1992 (16,1 millones). Este importante crecimiento es producto del estado actual de la caficultura colombiana que actualmente cuenta con los mejores indicadores de su historia: variedades resistentes en el 83% de los cafetales, edad promedio de 6,6 años, densidad promedio de 5.243 árboles/ha y productividad de 21,4 sacos/ha (FNC, 2020). Por cuanto se registran 742.373,45 hectáreas sembradas a nivel nacional, con una producción 855.840 ton, con un rendimiento de 1,15 ton/ha, establecido el cultivo en 22 departamentos del país (Agronet, 2018) y acorde con la secretaria de agricultura (2018), 42 municipios del departamento se dedican al cultivo de café, se registran 47.200,9 hectáreas sembradas 51.263,6 ton de producción, con 1,19 ton/ha de rendimiento y 47.767 unidades productoras; ocupando el quinto lugar en exportaciones por su calidad en tasa (Coral et al., 2019).

Debido a la importancia agrícola, social, económica y a los beneficios que genera el cultivo de café a nivel mundial, se han desarrollado investigaciones para obtener conocimiento relacionado con diferentes metodologías eficientes en uso y duración para la evaluación técnica de su comportamiento y la proyección de prácticas culturales que permitan potencializar los componentes productivos del cultivo, tal como lo reportado por Montoya et al. (2017), quienes relacionaron de manera significativa la producción de café variedad Castillo sembrado a libre exposición con el área foliar con coeficiente de determinación del 78,3%, obteniendo un modelo de predicción del rendimiento a partir de la estimación de su área foliar.

Estudios indican que la producción del café tiende a aumentar inicialmente hasta valores inferiores al máximo de AF o IAF, y que estas características pueden ser usadas adecuadamente en la estimación del rendimiento para ser utilizadas en trabajos de campo como de laboratorio. Teniendo en cuenta, además que el estado de desarrollo de la planta evaluado mediante IAF, son determinantes en la producción final, sin embargo, se recomienda realizar estudios más detallados, con el fin de enfatizar las tendencias observadas (Arcila & Chaves, 1995; Malone et al., 2002; Montoya et al., 2017).

Por otra parte, Favarin et al. (2002), estudiaron la variación temporal de área foliar (AF) del cultivo del café, mediante un método simple y no destructivo, en este contexto, la medición del AF es un indicador de productividad, además de que es fácil de identificar a través de variables como el diámetro de la sección inferior del dosel (primer par de ramas) y altura de la planta.

Adicionalmente, Cabezas et al. (2009), determinaron un modelo que utiliza las medidas de longitud y ancho de las hojas, como producto de la multiplicación de los dos atributos foliares, para proveer estimaciones de alta precisión para la determinación rápida y económica del área foliar en plantas de *A. acuminata*, *E. pendula* y *Q. humboldtii*. Y proponen que las ecuaciones propuestas en la investigación pueden ser empleadas con seguridad en estudios fisiológicos, biológicos, ambientales, agronómicos, ecológicos y forestales, sin necesidad de recurrir al muestreo destructivo.

No obstante, pese a la importancia de la producción de cafés especiales en el departamento de Nariño, son pocos o nulos los estudios desarrollados sobre la estimación del área foliar y su relación con el rendimiento del cultivo a partir de la evaluación de variables de fácil registro como: altura de la planta, diámetro del tallo, número de ramas primarias, número de hojas por planta, área foliar e índice de área foliar. Siendo esta una alternativa cada vez más utilizada, ya que constituye una forma barata, rápida, fiable y no destructiva de medir el tamaño de las hojas y predecir un posible rendimiento del cultivo. Tal como lo descrito por Montoya et al. (2017), quienes afirman que, en una primera aproximación, por cada 100cm<sup>2</sup> de área foliar, la producción en el árbol se incrementa en 2,37g de café cereza verde. Por su parte Marín et al. (2018), determinaron la relación del área foliar de café robusta (*Coffea canephora*) con la concentración de clorofila y el contenido de nutrimentos. De igual modo, Zhang & Pan (2011) especifican que se han desarrollado otros métodos basados en la modelación matemática de la relación entre las dimensiones de la hoja, largo y ancho y su área foliar.

Por lo tanto, la estimación del área foliar del café variedad Castillo y la evaluación de variables relacionadas con el rendimiento del café es esencial para la modelación de su desarrollo y la predicción de su potencial productivo. Dicho lo anterior, este estudio tiene como objetivo obtener una ecuación de regresión que permita calcular el área foliar del café y estimar el rendimiento del cultivo de café variedad Castillo a partir de variables relacionadas con el área foliar en el departamento de Nariño.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización

Este trabajo se realizó durante los primeros semestres del 2017 y 2018, en cuatro municipios del departamento de Nariño: La Unión, Consacá, Sandoná y La Florida, ubicados en las coordenadas mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1.**  
*Ubicación geográfica de los lotes evaluativos.*

Municipio	Lote experimental	Altitud (m.s.n.m)	LO	LN
Sandoná	Las delicias	1.536	77°44' 54"	1°13' 36"
	Mana I	1.700	77°48' 32"	1°10' 25"
	La Cruz	2.015	77°46' 45"	1°12' 27"
La Unión	La Playa	1.430	77°09' 00"	1°38' 28"
	El Sauce	1.620	77°07' 38"	1°34' 23"
	Buenos Aires	2.030	77°07' 38"	1°34' 23"
Consacá	Cariaco Bajo	1.577	77°28' 07"	1°10' 30"
	Bomboná	1.668	77°27' 31"	1°11' 26"
	San Antonio	1.989	77°25' 56"	1°12' 50"
La Florida	La Joya	1.677	77°17' 56"	1°22' 06"
	Santa Ana	1.877	77°18' 53"	1°23' 56"
	San Francisco	2.030	77°20' 43"	1°22' 20"

Evaluaciones adicionales de las variables estudiadas se realizaron en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas, ubicado en la Universidad de Nariño, sede Torobajo del municipio de Pasto, a 2.540 m.s.n.m, 01°12'13"LN y 77°15'23"LO. Para lo cual fue necesario realizar el transporte de las muestras desde cada uno de los lotes descritos.

### Material vegetal y diseño experimental

En los cuatro municipios se sembró café variedad Castillo, regional Tambo, donde se establecieron 12 parcelas experimentales (tres por municipio), bajo un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA), en el que el criterio de bloque corresponde a la ubicación de cada uno de los lotes, debida a su altitud y los tratamientos son los sistemas agroforestales previamente establecidos:

- T1: café (1,3 x 1,3m) más limón Tahití (8 x 16m) más aguacate (8 x 16m).
- T2: café (1,3 x 1,3m) más guamo macheto y/o carbonero gigante (9 x 9m).
- T3: café (1,3 x 1,3m) más guamo macheto y/o carbonero gigante (12 x 12m).
- T4: café a libre exposición solar (monocultivo).

Cada ensayo contaba con un área de una hectárea, de la cual cada tratamiento disponía una extensión de 2.500 m<sup>2</sup>, siendo esta la parcela experimental, en donde se registraron las evaluaciones en 4 plantas por cada uno de los tratamientos.

### **Muestreos y obtención de modelo para la estimación del área foliar**

Para su determinación se utilizó un método destructivo, combinando técnicas planimétricas (mediciones de la hoja) y gravimétricas (peso de las hojas) (Jonckheere et al., 2004). Por lo tanto, se seleccionó un total de 100 hojas por municipio de estudio de diferentes estados de crecimiento en plantas de café variedad castillo. De cada hoja se registró el ancho y largo en cm y peso en g.

El área de su superficie de cada una de las hojas se midió mediante el software IMAGEJ. Este programa de versión libre, permite el análisis y procesamiento de imágenes. Puede mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir en 8 bits, imágenes de 16 bits y 32 bits; así mismo calcula valores de área y pixeles, ofrece la opción de analizar objetos por tamaño y forma y aplicar diversos estadísticos a los resultados media, mediana, mínimo, máximo (Rasband, 1997–2016).

Por lo tanto, inicialmente se tomaron fotografías de cada foliolo muestreado sobre una hoja de papel milimetrado. La determinación del valor del área foliar se realizó mediante el procesamiento de la imagen en el software IMAGEJ acorde con la metodología propuesta por Saucedo - Acosta et al. (2015), calibrando en el programa el valor equivalente de 1 cm lineal de la hoja milimetrada y señalando el perímetro del foliolo evaluado (Gonzales, 2018).

Los datos obtenidos fueron organizados en una matriz de Excel para ser analizados en el programa CurveExpert 1.4 y obtener un modelo matemático lineal  $y=a\pm bx$  que permita el cálculo del área foliar; donde “y” como variable dependiente corresponde al área foliar y “x” como variable independiente a cualquiera de las variables largo, ancho y peso de hoja.

### **Evaluación de variables relacionadas con el área foliar**

Para las variables que se mencionan a continuación se realizó el muestreo en 4 plantas por cada uno de los tratamientos mencionados anteriormente.

- **Altura de planta (AP):** se midió con cinta métrica la longitud desde el suelo hasta el ápice de la planta en cm.
- **Diámetro del tallo (DT):** se midió en cm el diámetro en la parte basal del tallo a 10 cm del suelo.
- **Número de Ramas primarias (NRP):** se contabilizó el número de ramas primarias.
- **Número de hojas totales (NHT):** se contabilizó el número totales de hojas de la planta.
- **Área foliar total de la planta (AF):** Para medir el área foliar de los árboles se utilizó el modelo lineal obtenido en el anterior ítem de este documento. Una vez calculado el área foliar promedio por hoja en cm<sup>2</sup>, se multiplicó por el total de hojas por planta, para obtener AF.

- **Índice de área foliar (IAF):** se determinó mediante la ecuación  $IAF=AF/AS$ . Donde AF, corresponde al área foliar en  $m^2$ , y el AS, al área de suelo asignada en  $m^2$ .

#### Evaluación de variables de producción

Al igual que en variables relacionadas con el área foliar, las variables que se mencionan a continuación se evaluaron en 4 plantas por cada uno de los tratamientos.

- **Número de frutos por planta (NFPP):** se contabilizó la totalidad de los frutos de una planta.
- **Peso promedio fruto (PPF):** se registró y promedió el peso de 10 frutos de café cereza por planta en g.
- **Café pergamino seco (CPS):** se recolectó una muestra de 1 kilogramo de café cereza por tratamiento, se despulpó y se dejó secar hasta obtener el color verde oliva que indica que es un café pergamino seco (cps) registrando el peso de este último en g.
- **Rendimiento por planta (RPP):** el cual se obtuvo del producto entre el número de frutos por planta y el peso promedio de los frutos en g.

#### Análisis de información

Los datos obtenidos en cada una de las variables evaluadas fueron organizados en una base de datos en Excel, posteriormente se realizó un análisis de varianza combinado en el tiempo con el modelo lineal aditivo (diseño en BCA/tiempo como factor):  $y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \lambda_k + \tau_i * \lambda_k + \epsilon_{ijk}$ , donde:  $y_{ijk}$  = observaciones;  $\mu$  = media poblacional;  $\tau_i$  = efecto de tratamiento;  $\beta_j$  = efecto de bloque;  $\lambda_k$  = efecto de tiempo (evaluación);  $\tau_i * \lambda_k$  = efecto de interacción;  $\epsilon_{ijk}$  = error experimental, con una probabilidad del 95%, en el que se determinó el efecto de los 4 tratamientos y la ubicación debida a la altitud sobre cada una de las variables. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar un análisis de correlación de Pearson para establecer el grado de asociación que existe sobre las variables evaluadas y finalmente obtener un modelo de predicción del rendimiento con aquellas de mayor correlación mediante un análisis de regresión múltiple. Para lo anterior se utilizó el paquete estadístico SAS 9,4 (SAS Institute, Inc, Cary, NC) utilizando PROC ANOVA para el análisis de varianza, el algoritmo PROC CORR para la correlación y PROC REG TEPWISE SLENTRY para la regresión.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Modelo de estimación del área foliar

La expresión lineal con intercepto y coeficiente diferente de cero se obtuvo con la variable largo de hoja, cuyo valor de coeficiente de determinación fue  $r^2 = 91,7\%$ , lo cual indica la bondad del ajuste del modelo y la influencia de las variables independientes sobre AF:

$$AF=(a+bX)(1+cX+dX^2)$$

Dónde:

$$a = 4,541 \quad c = -0,154$$

$$b = 2,38 \quad d = 0,0075 \quad X = \text{longitud promedio de seis hojas (bajas, medias, superiores)}.$$

En diferentes estudios se registra la posibilidad de medir el área foliar mediante el uso de imágenes, tal como lo reportado por Del Águila et al. (2018), quienes calcularon el área foliar de café mediante fotografías a las hojas de las plantas analizadas en el software ASSES a través de los colores de contraste y la calibración de un objeto de área conocida.

Por otra parte, los modelos que incluyen sólo una variable (largo o ancho) en el cálculo del área foliar, son apropiados cuando se obtienen y aplican en la misma especie (Galindo & Clavijo, 2007). Lo cual concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación donde el modelo de mayor ajuste se presentó con la variable largo de hoja.

En contraste, con lo anterior Montoya et al. (2017) demostraron que es posible utilizar el número de hojas por rama para estimar el área foliar en café, obteniendo un modelo matemático con coeficiente de determinación del 82%. Adicionalmente, Duarte - Canales (2016) para la evaluación de la variable área foliar ( $m^2$ ) del cultivo de café, utilizó una metodología biometría obtenida a partir mediciones de cinco plantas y aplicado un factor de 0,7243, con evaluaciones de largo y ancho de las hojas. De igual modo Rodríguez et al. (2016), menciona la posibilidad de calcular indirectamente el área foliar a partir de la longitud de cada una de las hojas.

En cuanto al ANDEVA (Tabla 2) en las variables evaluadas no hubo diferencias significativas entre la ubicación de los lotes, definida por su altitud y los tratamientos. Los resultados obtenidos, evidencian que aparte de la altitud, el comportamiento de las variables evaluadas obedece a otro tipo de factores climáticos, que podrían ser la precipitación, temperatura, microclimas, entre otros, que además contrastan con el concepto de que la altitud óptima para la producción del cultivo de café en Colombia, está entre 1.200 y 1.800 m.s.n.m (Ramírez et al., 2013; Ramos & Criollo, 2017).

Por lo tanto, se evidencia que no exista un factor diferencial entre la ubicación de los lotes y los tratamientos establecidos que se deba considerar para la predicción del rendimiento de un cultivo de café variedad Castillo en el departamento de Nariño a través de su área foliar y el modelo de regresión que se obtenga podría ser aplicado en cualquier ubicación y porcentajes de sombra equivalente a los establecidos en esta investigación y a café a libre exposición.

Los resultados obtenidos y mostrados en el ANDEVA. Están acordes con lo mencionado por Ocampo et al. (2017), quienes afirman que la radiación solar es necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en el cultivo del café y está determinada por el microclima de donde se desarrolle la planta, por las condiciones de nubosidad, las propiedades del follaje y la densidad de siembra.

No obstante estos efectos no se evidenciaron en los resultados de esta investigación, probablemente porque a través de los tratamientos evaluados se proporciona una regulación de la luz que resulta beneficioso para el desarrollo y crecimiento de las plantas evidenciado en la

**Tabla 2.**

Cuadrados medios para las variables relacionadas con componentes fisiológicos y de rendimiento en café (*Coffea arabica* L.) var Castillo evaluadas en cuatro municipios de la región natural andina del departamento de Nariño (Colombia).

FV	G.L.	AP	DT	NH	NRP	AF
Bloque (lote)	11	4869.20ns	2.54ns	351481.26ns	552.06ns	7951403200.1ns
Tratamientos	3	147.03ns	1.17ns	12157,15ns	217.18ns	243231335.14ns
Error	380	581.12	0.46	19548.45	98	424388596.9
Media		128.8	3.83	664.34	49.46	94318.93
R <sup>2</sup>		0.0019	0.019	0.0048	0.017	0.0045
CV(%)		18.71	17.84	21.04	20.01	21.84

  

FV	G.L.	IAF	NFPP	PPF	CPS	RPLAN
Bloque (lote)	11	150.01ns	248522.8ns	0.59ns	516212.39ns	11505075.9ns
Tratamiento	3	4.59ns	556328.7ns	0.019ns	117358.37ns	2652369.4ns
Error	380	8	371079	0.098	75704.07	1689890
Media		12.95	809.88	2.04	342.63	1639.2
R <sup>2</sup>		0.0045	0.011	0.001	0.012	0.012
CV(%)		21.84	75.21	15.38	80.30	79.30

\*= diferencias significativas al 95% de confiabilidad. AP = altura de planta, DT = diámetro de tallo, NH = Número de hojas, NRP = número de ramas primarias, NRS = número de ramas secundarias, NRT = número de ramas totales, NHPR = número de hojas por rama, AFPR = área foliar por rama, AF = área foliar total de la planta, IAF = Índice de área foliar, NFPP = número de frutos por planta, PPF = peso promedio de fruto, CPS = café pergamino seco, RPlan = rendimiento por planta. Conciuerdan, corresponden,

contribución al mejoramiento de la calidad del café, la disminución del estrés causado por factores abióticos como los causados por la deficiencia del agua y aumentando la eficiencia de la planta al uso de la luz debido en los procesos en los cuales este factor interviene tal como la fotosíntesis, transpiración y morfogénesis (Charbonnier et al., 2013).

Sin embargo, otros resultados muestran similitud con esta investigación como lo obtenido por Gommers et al. (2013), quienes señalan que el área foliar del café en todos los niveles de sombra se comportó de manera similar y que además al someterse al sombrero incrementa el área foliar para optimizar la captura y utilización de la luz. Adicionalmente, se ha reportado que el exceso de luz provoca la foto inhibición de los cafetos, mientras que la baja y media sombra inducen mayor tasa de transpiración que los cafetos con mayor cantidad de sombra, lo cual se ve reflejado en la eficiencia del desarrollo fisiológico de los mismos (De Lima et al., 2017; Charbonnier et al., 2017 y Zapata et al., 2017).

Dicho lo anterior, se continuó con los análisis estadísticos con el total de los datos sin distinguir ubicación y tratamientos. De modo que en el Análisis de Correlación de Pearson (Tabla 3) se observaron asociaciones fuertemente significativas de la AP con el DT ( $r = 0,61$ ) y el NRP ( $r = 0,64$ ). El signo y la magnitud de estas relaciones indican una correlación directa, lo cual quiere decir que si aumenta la AP también aumentan el DT y el NRP. Esto corresponde a un comportamiento natural de la planta, dado que a medida que la altura aumenta también lo hace el diámetro; de igual manera sucede con las ramas primarias entre mayor altura tenga una planta, existirán más ramas primarias productoras (Arcila *et al.*, 2007).

El crecimiento aéreo de las plantas de café se debe a las células meristemáticas ubicadas en las yemas apicales de los ápices del tallo y ramas y en las yemas laterales, axilares y seriadas de las axilas de las hojas. Por lo tanto es el ápice de los tallos el responsable del crecimiento ortotrópico evidenciado en la formación de nudos, hojas y del crecimiento en altura de la planta, mientras que el ápice de ramas encargado del crecimiento plagiotrópico contribuye con la formación de nudos, hojas y la expansión lateral de la planta (Arcila *et al.*, 2007).

El NH está relacionado significativamente con NRP (0,62) y con AF e IAF ( $r = 0,99$  para ambos), la magnitud de estas últimas relaciones es casi perfecta lo cual indica que de la cantidad de hojas por árbol dependerá el AF y el IAF.

El IAF está altamente relacionado con el IAF ( $r = 0,99$ ), lo cual se explica porque al momento de determinar el IAF, se realiza mediante la relación entre el AF con el AS, dado que si no existe el AF difícilmente se podrá obtener el IAF.

El NFPP está altamente relacionado con el CPS ( $r = 0,96$ ) y con RPLAN ( $r = 0,97$ ), de acuerdo a la cantidad de frutos que haya en planta y lleguen a su madurez fisiológica para su posterior cosecha, determinará el rendimiento y por ende la cantidad de CPS que se pueda obtener. El CPS está altamente relacionado con el RPLAN ( $r = 0,99$ ), el signo y la magnitud de estas relaciones indica una correlación directa casi perfecta, lo cual quiere decir que al aumentar el CPS se incrementará el RPLAN, además este está relacionado también con el NFPP ( $r = 0,15$ ), de tal manera que si aumenta el NFPP se incrementará el RPLAN y por ende el CPS.

Acorde con los datos obtenidos no todas las variables estudiadas se correlacionan con el rendimiento del cultivo, lo cual concuerda con Sadeghian y Salamanca (2015) quienes afirman que, en las plantas de café, cuando las hojas terminan de crecer se convierten en fuentes potenciales de nutrimentos que son movilizados hacia los frutos y raíces, lo que conlleva a la reducción de estas en número. Sin embargo, Plaza *et al.* (2015), obtuvieron correlaciones positivas y significativas entre la altura de planta con las variables: diámetro del tallo, número de ramas por árbol, número de ramas productivas, longitud de rama y número de nudos por rama, afirmando que hay que asegurar un buen crecimiento vegetativo para obtener altos niveles de producción.

El análisis de regresión se realizó con la totalidad de las variables, teniendo en cuenta que si

bien el coeficiente de relación fue bajo, la correlación fue altamente significativa, excepto con PPF que fue significativa (Tabla 3). Se obtuvo con un porcentaje de ajuste del 99,52% que el mejor modelo en cuanto a precisión para el cálculo del rendimiento estuvo conformado por las variables NH, AF, NFPP, PPF y CPS:

$$RPLAN = -413,49 + 1,64 * NH - 0,0109 * AF + 0,53 * NFPP + 168,38 * PPF + 3,53 * CPS$$

La regresión lineal permite obtener modelos los cuales explican el aporte que realizan las variables, en este caso en el rendimiento del cultivo de café. Los estudios relacionados con la aplicación de la regresión lineal en el cultivo investigado son muy pocos o casi nulos, sin embargo, estudios en otros cultivos representan un buen modelo en variables fisiológicas. Al respecto, Kumbhani *et al.* (2017), relacionaron el peso seco del limbo de plantas de *Helicteres isora* L. con el rendimiento a través de una ecuación de modelo lineal obteniendo proyecciones ajustadas a los valores reales. Además de que parámetros calculados a través de métodos no destructivos han sido útiles para desarrollar modelos lineales y cuadráticos para las estimaciones de variables de interés (Quevedo *et al.*, 2012), como lo ocurrido en esta investigación con el cálculo del área foliar y la utilización de esta y otras variables correlacionadas para la estimación de la producción de café variedad Castillo.

Adicionalmente, Unigarro *et al.* (2015), validaron cuatro expresiones para estimar el área de las hojas de café a partir de hojas individuales, basado en mediciones de variables simples y no

**Tabla 3.**

Matriz de correlaciones lineales entre las variables relacionadas con el área foliar y productivas de café (*Coffea arabica* L.) var Castillo evaluadas en cuatro municipios de la región natural andina del departamento de Nariño (Colombia).

	AP	DT	NH	NRP	AF	IAF	NFPP	PPF	CPS	RPLAN
AP	1	<b>0,61**</b>	0,30**	<b>0,64**</b>	0,26**	0,26**	0,36**	0,02ns	0,35**	0,35**
DT	-	1	0,33**	0,51**	0,33**	0,33**	0,29**	-0,05ns	0,26**	0,26**
NH	-	-	1	<b>0,62**</b>	<b>0,99**</b>	<b>0,99**</b>	0,19**	-0,04ns	0,16**	0,17**
NRP	-	-	-	1	0,59**	0,59**	0,33**	0,005ns	0,31**	0,31**
AF	-	-	-	-	1	<b>0,99**</b>	-0,19**	-0,08ns	0,15**	0,16**
IAF	-	-	-	-	-	1	0,19**	-0,08ns	0,15**	0,16**
NFPP	-	-	-	-	-	-	1	-0,08ns	<b>0,96**</b>	<b>0,97**</b>
PPF	-	-	-	-	-	-	-	1	0,13*	0,12*
CPS	-	-	-	-	-	-	-	-	1	<b>0,99**</b>
RPLAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

\*= diferencias significativas al 95% de confiabilidad. AP = altura de planta, DT = diámetro de tallo, NH = Número de hojas, NRP = número de ramas primarias, NRS = número de ramas secundarias, NRT = número de ramas totales, NHPR = número de hojas por rama, AFPR = área foliar por rama, AF = área foliar total de la planta, IAF = Índice de área foliar, NFPP = número de frutos por planta, PPF = peso promedio de fruto, CPS = café pergamino seco, RPlan = rendimiento por planta.

destructivas, siendo la expresión que incluye el largo y peso de hoja la de mayor ajuste.

Montemayor *et al.* (2017), en su estudio utilizaron la regresión lineal que les permitió generar modelos que ayudan a entender, cuantificar y estimar variables en la ingeniería del riego como lámina de riego y evaporación, para cultivos como el maíz forrajero. Asimismo, se pueden establecer funciones que ayudan a la estimación de materia seca de este cultivo a partir del conocimiento del IAF.

Montoya *et al.* (2017), determinaron una relación entre la producción de café cereza verde y el área foliar obtenida a partir de la suma de las áreas estimas de las ramas (AFEA), indicando que por cada 100 m<sup>2</sup> del área foliar la producción del árbol se incrementa 2,37 g de café cereza verde, de acuerdo con la ecuación:

$$\text{Producción de café cereza verde del árbol (g)} = 0,0237 * \text{AFEA (cm}^2\text{)}.$$

Además, exploraron la relación entre el área foliar y la producción de café cereza, determinando el número de ramas por árbol en la cual se debía contar el número de hojas, para estimar el área foliar del árbol con un error menor al 20%. Para estimar el área foliar de un árbol, debe tomarse al menos el 43,7% de sus ramas y contar el número de hojas en cada una de ellas, con este tamaño de muestra se asegura un error de estimación del área foliar del árbol máximo del 20% con una probabilidad del 95%.

## CONCLUSIONES

1. Un nivel adecuado de sombra permite el desarrollo fisiológico normal de la planta y contribuye a contrarrestar los efectos climáticos naturales debidos a la ubicación o altitud de los lotes, además no afecta el desarrollo de variables fisiológicas como el área foliar y su producción.
2. La determinación de la longitud de hoja permite obtener, con un ajuste del 91,7%, el área foliar de los folíolos del cafeto variedad Castillo.
3. El modelo de regresión lineal con un ajuste del 99,52% con las variables NH, AF, NFPP, PPF y CPS, son las que realizan su mayor aporte al rendimiento del cultivo.
4. La correlación directa entre número de hojas con el AF y el IAF, indica que las hojas tienen un papel importante en el rendimiento del cultivo, puesto que estas son reservorios de nutrientes al momento del desarrollo del fruto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agronet (2018). Red de información y comunicación del sector Agropecuario Colombiano. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A. Salazar, L., e Hincapié, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/720/1/Sistemas%20producci%C3%B3n%20café%20Colombia.pdf>
- Arcila, J., & Chaves, B. (1995). Desarrollo Foliar del cafeto en tres densidades de siembra. Cenicafé, 46 (1), 5-20. <https://biblioteca.cenicafe.org/jspui/bitstream/10778/692/1/arc046%2801%295-20.pdf>
- Buttaro, D., Roupheal, Y., Rivera, C.M., Colla, G., & Gonnella, M. (2015). Simple and accurate allometric model for leaf area estimation in *Vitis vinifera* L. genotypes. *Photosynthetica*, 53(3), 342-348. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0117-2>
- Cabezas-Gutiérrez, M., Peña, F., Duarte, H.W., Colorado, J.F., & Lora-Silva, L. (2009). Área foliar en especies forestales. *Actualidad & Divulgación Científica*, 12(1), 121-130. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/648/643>
- Charbonnier, F., Le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J., Vaast, P., Vierling, L. & Roupsard, O. (2013). Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181, 152-169. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.07.010>
- Charbonnier, F., Roupsard, O., Le Maire, G., Guillemot, J., Casanoves, F., Lacoïnte, A., Vaast, P., Allinne, C., Cambou, A., Clément, A., Defrenet, E., Duursma, R., Jarri, L., Jourdan, C., Khac, E., Leandro, P., Medlyn, B., Saint, L., Thaler, P., & Dreyer, E. (2017). Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell Environment*, 40(8), 1592-1608. <https://doi.org/10.1111/pce.12964>
- Secretaria de Agricultura. (2008). Consolidado Agropecuario de Nariño. Colombia: Universidad Sergio Arboleda.
- Coral Rojas, Y. E., Moncayo Rosero, J. K., Realpe Cabrera, I. A., & Mujica Betancourt, R. D. (2019). Oferta exportable del sector cafetero del Departamento de Nariño, (2010-2018). *Visión Empresarial*, (9), 135-150. <https://doi.org/10.32645/13906852.876>

- De Lima, K., Gontijo, P., Furtini, A., Oliveira, H., & Lacerda, J. (2017). Effect of Magnesium on Gas Exchange and Photosynthetic Efficiency of Coffee Plants Grown under Different Light Levels. *Agriculture*, 7(10), 1-11.  
<https://doi.org/10.3390/agriculture7100085>
- Del Aguila, K., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., & Becerra, A. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrícicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información tecnológica*, 29(1), 137-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>
- Duarte-Canales, H. (2016). Efecto del riego en crecimiento y rendimiento del café (*Coffea arabica* L.) CATRENIC, Nicaragua, 2016. *Ingeniería Agrícola*, 6(4), 17-22.  
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30118.73283>
- Favarin, J., Neto, D., García, A., Villa, N., & Vieira, M. (2002). Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeiro. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 37(6), 769–773.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600005>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC]. (2020, 14 de enero). Indicadores. <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cerro-el-2019-en-148-millones-de-sacos/>
- Figueroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., y Godínez-Montoya, L. (2015). La Producción y el Consumo del Café. ECORFAN.  
[https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO\\_CAFE.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf)
- Galindo, J. R., & Clavijo, J. (2007). Modelos alométricos para estimar el área de los folíolos de arveja (*Pisum sativum* L.). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 37–43.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol8\\_num1\\_art:81](https://doi.org/10.21930/rcta.vol8_num1_art:81)
- Gommers, C., Visser, E., Onge, K., Voesenek, L., & Pierik, R. (2013). Shade tolerance: when growing tall is not an option. *Trends in Plant Science*, 18(2), 65-71.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>
- Gonzales, A. (2018). Image J una herramienta indispensable para medir el mundo biológico. *Folium Relatos botánicos*, (1), 1-15.  
[https://www.researchgate.net/publication/328253430\\_Image\\_J\\_una\\_herramienta\\_indispensable\\_para\\_medir\\_el\\_mundo\\_biologico#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/328253430_Image_J_una_herramienta_indispensable_para_medir_el_mundo_biologico#fullTextFileContent)
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Methods for leaf area index determination. Part I. Theories, techniques and instruments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19 – 35.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>

Kumbhani, N., Kuvad, R., & Thaker, V. (2017). Development of linear model for leaf area measurement of two medicinally important plants: *Helicteres isora* L. and *Vitex negundo* L. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 5(03), 057-060.

<https://doi.org/10.7324/JABB.2017.50310>

Malone, S., Herbert, D., & Holshouser, D. (2002). Relationship between Leaf Area Index and yield in double-crop and full-season soybean systems. *Journal of Economic Entomology*, 95(5), 945-951. <https://doi.org/10.1093/jee/95.5.945>

Marín-Garza, T., Gómez-Merino, F.C., Aguilar-Rivera, N., Murguía-González, J., Trejo-Téllez, L.I., Pastelín-Solano, M.C., & Castañeda-Castro, O. (2018). Variaciones en área foliar y concentraciones de clorofilas y nutrientes esenciales en hojas de café robusta (*Coffea canephora* P.) durante un ciclo anual. *Agroproductividad*, (11)4, 36-41.

<https://doi.org/10.32854/agrop.v11i4.266>

Montemayor Trejo, J. A., Munguía López, J., Segura Castruita, M. Ángel, Yescas Coronado, P., Orozco Vidal, J. A., & Woo Reza, J. L. (2017). La regresión lineal en la evaluación de variables de ingeniería de riego agrícola y del cultivo de maíz forrajero. *Acta Universitaria*, 27(1), 40-44. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1255>

Montoya R, E.C., Hernández A, J.D., Unigarro M, C.A., & Flórez R, C.P. (2017). Estimación del área foliar en café variedad castillo a libre exposición y su relación con la producción. *Revista Cenicafe*, 68(1), 55-61.

<https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Estimacion.pdf>

Ocampo López, O. L., Castañeda Peláez, K., & Vélez Upegui, J. J. (2017). Caracterización de los ecotopos cafeteros colombianos en el Triángulo del Café. *Perspectiva Geográfica*, 22(1). <https://doi.org/10.19053/01233769.6100>

Plaza Avellán, L., Loor Solórzano, R., Guerrero Castillo, H., & Duicela Guambi, L. (2015). Caracterización fenotípica del germoplasma de *Coffea canephora* Pierre base para su mejoramiento en Ecuador. *ESPAMCIENCIA*, 6(1), 7-13. [http://revistasespam.espam.edu.ec/index.php/Revista\\_ESPAMCIENCIA/article/view/90](http://revistasespam.espam.edu.ec/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/90)

Quevedo García, E., Arévalo González, M. E., & Cancino Escalante, G. O. (2012). Determinación de un Modelo Matemático para la Estimación del Área Foliar y Peso Seco del Limbo de *Prunus persica* cv. Jarillo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(2). <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/36458>

Ramírez, H., Jaramillo, A., & Peña, J. (2013). Gestión del riesgo agroclimático:

- vulnerabilidad y capacidad de adaptación del sistema de producción de café. En: Gast, F., Benavides, P., Sanz, J.R., Herrera, J.C., Ramírez, V.H., Cristancho, M.A., & MARÍN, S.M. (Eds), Manual del cafetero colombiano Investigación y tecnología para la sostenibilidad en la de la caficultura, Tomo I (pp. 91-114). Bogotá D.C. Ed. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – Cenicafe.  
[https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras\\_publicaciones/Manual\\_Cafetero](https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/Manual_Cafetero)
- Ramos V., L. J., & Criollo E., H. (2017). Physical and sensory quality of Coffea arabica L. variety Colombia variety, Nespresso AAA profile, in the Union, Nariño. Revista De Ciencias Agrícolas, 34(2), 83-97. <https://doi.org/10.22267/rcia.173402.74>
- Rasband. W. (1997-2016). Image J.U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. <https://imagej.nih.gov/ij>
- Rodríguez Larramendi, L.A., Guevara Hernández, F., Gómez Castro, H., Fonseca Flores, M., Gómez Castañeda, J.C., & Pinto Ruiz, R. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (Coffea arabica L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. Acta Agronómica, 65(3), 248 - 254. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.46731>
- Sadeghian K, S., & Salamanca J, A. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. Cenicafe, 66(2), 73-87. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Micronutrientes.pdf>
- Sauceda-Acosta, C., Lugo-García, G., Villaseñor-Mir, H., Partida-Ruvalcaba, L. y Reyes-Olivas, A. (2015). Un método preciso para medir severidad de roya de la hoja (Puccinia triticina Eriksson) en trigo. Fitotec, 38(4), 427-434.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000400011](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400011)
- Unigarro-Muñoz, C., Hernández-Arredondo, J., Montoya-Restrepo, E., Medina-Rivera, R., Ibarra-Ruales, L., Carmona-González, C., & Flórez-Ramos, C. (2015). Estimation of leaf area in coffee leaves (Coffea arabica L.) of the Castillo® variety. Bragantia, 74(4), 412-416. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0026>
- Valbuena, N., Parraga, C., Linares, L., Ramos, J., & Junco, J. (2016). Modelos de estimación de área foliar a partir de observaciones morfológicas en Brachiaria brizantha cv. Toledo. Unelles de Ciencia y Tecnología, 34, 40-44.  
<http://revistas.unellez.edu.ve/.../248>
- Williams, L., & Martinson, T. (2003). Nondestructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'De Chaunac' grapevines. Scientia Horticulturae, 98(4), 493-498.  
[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00020-7)



- Zapata Arango, P. C., Andrade Castañeda, H. J., & Nieto Abril, Z. K. (2017). Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo en sistemas agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1), 61–70. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.63>
- Zhang, L., & Pan, L. (2011). Allometric models for leaf area estimation across different leaf-age groups of evergreen broadleaved trees in a subtropical forest. *Photosynthetica*, 49(2), 219-226. <https://doi.org/10.1007/s11099-011-0027-x>