

Artículo original

¿Es el guamo (*Inga densiflora* Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?

Is guamo (*Inga densiflora* Benth.) a beneficial tree as a companion of coffee seedlings under differential fertilization?

✉ Inge Armbrecht, ✉ Wilmar Torres, ✉ Nicole Vargas-García

Departamento de Biología, Universidad del Valle

Artículo de posesión para admisión de Inge Armbrecht, como miembro de número a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

El uso de árboles leguminosos como sombra de los cultivos de café podría ser parte de una estrategia para la agricultura del futuro en un contexto de cambio climático en los trópicos. El guamo (*Inga* spp., Fabaceae) es un árbol leguminoso tradicionalmente usado por sus beneficios de amortiguación del microclima y mejoramiento de las propiedades del suelo. Sin embargo, no se sabe si su beneficio como sombra para el café se produce desde que se establece la plantación o a medida que transcurre el tiempo. Para demostrar si la proximidad de plántulas de guamo afecta el crecimiento de las de café con diferentes tipos de fertilización, se sembraron 360 cafetos y 90 plántulas de guamo (*Inga densiflora* Benth.) de tres meses de edad en un lote de 1.800 m² siguiendo un diseño de aleatorización estratificada con 90 parcelas y 270 subparcelas. Se asignaron aleatoriamente tres opciones de acompañante (guamo, otro cafeto y control), dos fuentes de fertilización (gallinaza comercial proveniente de la granja avícola Saramartina de Jamundí y copolímero orgánico), y el control sin abono. Mensualmente se midió la variable de crecimiento hasta alcanzar el año. Los tratamientos con gallinaza permitieron un crecimiento del cafeto significativamente mayor que el copolímero (23,4 % más de diámetro) y el control sin fertilizante (27,8 % más de diámetro). La altura de dichos cafetos fue 19,9 y 22,6 % mayor comparada con los tratamientos de copolímero y control, respectivamente. No se encontró un efecto del guamo como árbol acompañante. Se evidenció que la gallinaza es un abono orgánico efectivo para los cafetales y que la presencia de plántulas de guamo ni benefició (vía facilitación) ni perjudicó (vía competencia interespecífica) el establecimiento de los cafetales.

Palabras clave: Agroforestal cafetero; Cafetal de sombra; Colombia; Gallinaza; Guamo machete.

Abstract

The use of leguminous trees as shade for coffee plantations could be part of future agricultural strategies in the tropics to face climate change. The so-called “guamo” (*Inga* spp., Fabaceae) is a beneficial leguminous tree traditionally used for buffering microclimate and improving soil properties. However, it is not yet known whether the closeness of planted guamo seedlings brings benefits to coffee crops when they are established or whether this benefit comes with time. To examine whether the proximity of guamo affected the growth of coffee seedlings under different fertilization conditions, we planted 360 three-month-old guamo seedlings and 90 coffee seedlings of the same age in an 1800 m² plot using a stratified randomized design consisting of 90 plots and 270 subplots. We randomly assigned three treatments (guamo, coffee, and control without fertilizer), two fertilizers (commercial chicken manure and organic copolymer), and the control. Monthly growth measures were taken for a year. Seedlings grew the most with chicken manure (23.4% and 27.8% greater diameter than that obtained with the copolymer and the control, respectively) while the height

Citación: Armbrecht I, Torres W, Vargas-García N. ¿Es el guamo (*Inga densiflora* Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1084-1096, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1380>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Correspondencia:**

Inge Armbrecht;
inge.armbrecht@correounivalle.edu.co

Recibido: 22 de enero de 2021

Aceptado: 8 de julio de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

was 19.9% greater than that obtained with the copolymer and 22.6% greater than the control. The evidence supports that chicken manure was an effective organic fertilizer and the presence of guamo neither benefitted (via facilitation) nor damaged (via interspecific competition) the coffee saplings during the establishment of the plantation.

Keywords: Coffee agroforestry; Chicken manure; Colombia; *Guamo machete*; Shaded coffee.

Introducción

El café (*Coffea arabica* L.), perteneciente a la familia Rubiaceae, es uno de los cultivos agrícolas más relevantes en el mundo por su impacto económico y social (Chait, 2015). Cada vez más se reconoce la necesidad de incorporar árboles en los sistemas agrícolas (Bentley, *et al.*, 2004) frente a las incertidumbres relacionadas con el cambio climático (DaMatta, 2004). Dado que las plantaciones de café requieren diferentes niveles de sombra de árboles, la experiencia de su siembra tiene un potencial enorme en los sistemas agroforestales por los servicios ecosistémicos y la resistencia y resiliencia que brindan los árboles acompañantes para mantener la biodiversidad y brindar beneficios sociales (Urrutia-Escobar & Armbrecht, 2013; Avelino, *et al.*, 2015).

Los árboles que acompañan las plantaciones de café incluyen especies maderables y frutales, o de sombrío, como el guamo (*Inga* spp., Fabaceae), el nogal cafetero (*Cordia alliodora* (Ruíz & Pav. Oken, Boraginaceae) o el árbol del coral (*Erythrina* spp., Fabaceae) (Rapidel, *et al.*, 2015). Entre las más usadas para dar sombra al café en las zonas rurales de los Andes tropicales se encuentra el guamo (*Inga densiflora* L., Fabaceae) (Chait, 2015), una especie de leguminosa que se extiende desde México hasta el norte de Sur América (Groom, 2012). Los beneficios del sombrío en los sistemas agroforestales se relacionan con los aportes de nitrógeno a través de los residuos de podas y la descomposición de la hojarasca y las raíces (Siles & Harmand, 2010), así como con la generación de un microclima que disminuye el estrés asociado con las variaciones de temperatura (Cannavo, *et al.*, 2011).

Cuando la plántula de café se está estableciendo después de la siembra, otras plantas acompañantes podrían afectarla negativamente si existiera competencia intra o interespecífica, aunque también el efecto podría ser neutro o beneficioso (si hay facilitación) (Cannavo, *et al.*, 2011). El árbol de guamo beneficiaría los cafetos si se generaran en el suelo exudados de sus raíces, micorrizas o bacterias nitrificadoras, lo que contribuye a mejorarlo (Picone, 2002; Batterman, *et al.*, 2013). Puede suceder también que el beneficio se produzca con el tiempo, a medida que se afianzan las relaciones de mutualismo en sus raíces y se genera suficiente hojarasca para que el suelo se enriquezca de nutrientes con su descomposición. En el primer caso se esperaría que los cafetos crecieran más cuando tienen plantas de guamo como acompañantes o, en el segundo caso, que estas no tuvieran ningún efecto (o inclusive un efecto negativo) en el momento del establecimiento del cultivo. En este contexto, el propósito del presente estudio fue determinar si la proximidad de las plántulas de *Inga densiflora* (comúnmente llamado “guamo machete”) afectaba el crecimiento de plántulas recién sembradas de *C. arabica* bajo tres condiciones diferentes de fertilización. Se partió de la hipótesis de que las plántulas de café crecerían significativamente más acompañadas de plántulas de guamo y con cualquier tratamiento de fertilización orgánica que el control, es decir, sin guamo acompañante.

Materiales y métodos

El estudio se hizo a lo largo de un año, entre 2017 y 2018, en un lote preparado con maquinaria pesada hacía tres años que se había dejado en recuperación vegetal sin ningún tipo de agricultura.

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en el suroccidente colombiano, departamento del Cauca, municipio de Caldon, vereda el Rosal (2°49'44"N y 76°34'8"O), situada a 1.450 m una sobre el nivel del mar (Arenas-Clavijo & Armbrecht, 2019), cuyo paisaje consiste en pequeñas

parcelas campesinas en una zona montañosa con un mosaico en el que predominan potreros, cafetales, y cultivos de pan coger, como frijol y habichuela (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae), maíz (*Zea mays*, Poaceae), zapallo (*Cucurbita maxima*, Cucurbitaceae), yuca (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae), plátano y banano (*Musa x paradisiaca*, Musaceae), cítricos (*Citrus x cinensis*, *C. x limon*, *C. x reticulata*, Rutaceae), guayabos (*Psidium guajaba*, Myrtaceae) y mangos (*Mangifera indica*, Anacardiaceae). En la zona se siembran los cafetales en libre exposición (sin árboles de sombra o con plátano en baja densidad) o bajo la sombra de árboles como el guamo (*Inga spp.*), el aguacate (*Persea americana*, Lauraceae), el mano de oso (*Schefflera morototoni*, Araliaceae), el nacedero (*Trichantera gigantea*, Acanthaceae), el yarumo (*Cecropia spp.*, Urticaceae), y el cachimbo (*Erythrina sp.*, Fabaceae), entre otros. El suelo se caracteriza por ser ácido y arcilloso y requiere la aplicación de fertilizantes para la producción.

En junio de 2017 se escogió un lote de aproximadamente 1.800 m² (90 m x 20 m) (**Figura 1**) para desarrollar el experimento orientado a establecer el efecto de un árbol “acompañante” en el crecimiento de plántulas de café bajo tres condiciones de fertilización del suelo.

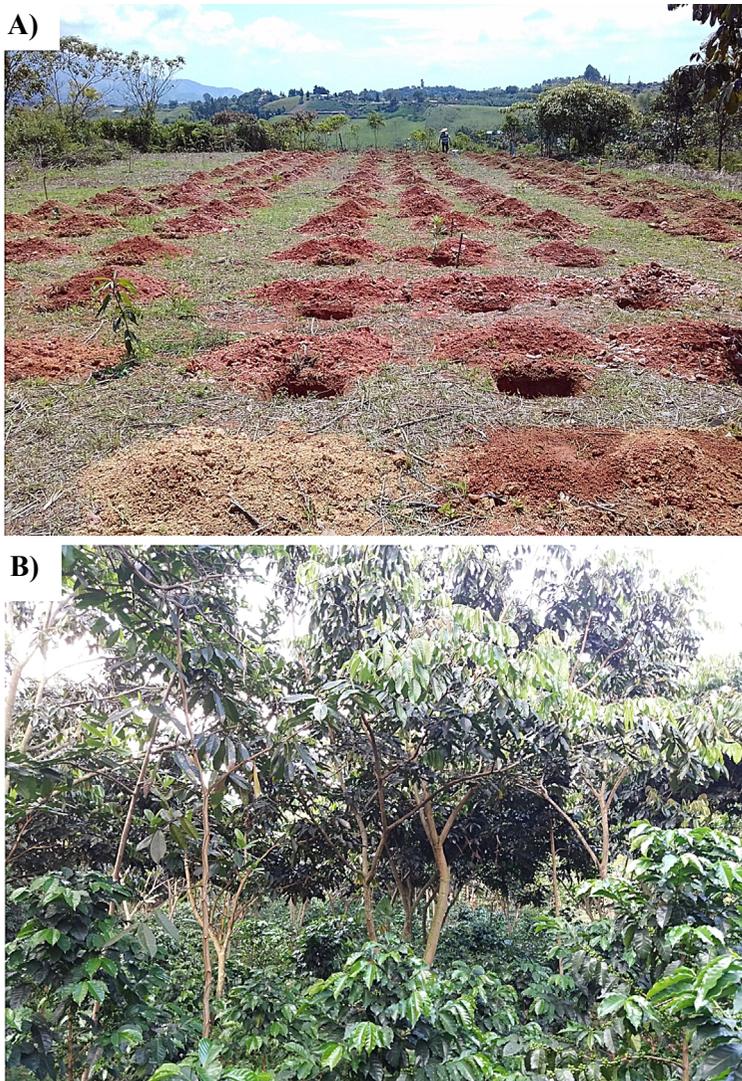


Figura 1. Panorámica del lote experimental en la vereda El Rosal. **a)** Fase de preparación del terreno para el establecimiento del experimento en julio de 2017. **b)** Aspecto del lote experimental tres y medio años después (diciembre 2020)

Se sembraron 360 plántulas de cafetos de la variedad Castillo-Tambo (Alvarado, *et al.*, 2005) y 90 de guamo (*I. densiflora*), de tres meses de edad, con un diseño de aleatorización estratificada o restringida consistente en 90 parcelas y 270 subparcelas de la siguiente manera: sobre un plano cartesiano de 30 hileras y tres columnas (Figura 2) se trazaron equidistantemente las parcelas, cada una de 320 x 50 cm (Figura 2, rectángulos de colores), con una separación de 3 m de una columna a la siguiente y de 2 m entre hileras. Cada hilera consistía de las plántulas con los tratamientos de fertilización y las del árbol acompañante dispuestas sucesivamente en 30 filas (réplicas). Dentro de cada parcela se establecieron tres subparcelas de 40 x 30 cm (Figura 2, rectángulos grises) en donde se asignaron aleatoriamente los tratamientos con árbol “acompañante”.

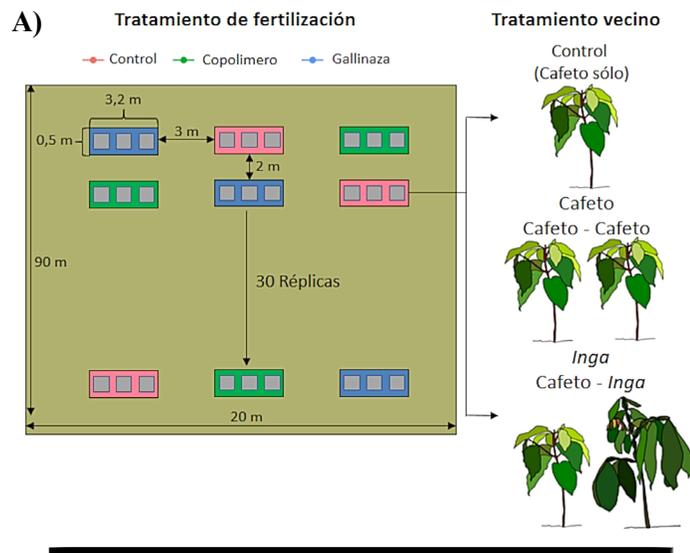


Figura 2. a) Esquema del diseño del experimento. Cada una de las 30 filas se consideró una réplica de cada tratamiento de fertilización (tres tratamientos) y de cada acompañante (tres posibilidades: sin acompañante, con otro café como acompañante o con guamo como acompañante). Cada una de las tres columnas representa un tratamiento de fertilización diferente: azul: gallinaza; verde: copolímero orgánico y rosado: control sin fertilizante. En cada parcela (rectángulos de colores) se asignaron aleatoriamente las tres subparcelas (rectángulos grises) a los tipos de acompañante, como se ilustra con el ejemplo de la parcela abierta. **b)** Presentación del copolímero orgánico: forma de aplicación original (izquierda: 30g), e hidratado (derecha)

Tratamiento de fertilización

Se les asignaron aleatoriamente tres tratamientos de fertilización a las tres parcelas de cada hilera, asignando a cada una un tratamiento de fertilización diferente. Los tratamientos fueron los siguientes: 1) gallinaza comercial (fertilizante orgánico) de excretas de gallinas ponedoras adultas mezcladas con restos de alimento y exocarpos (residuos) de cosecha de arroz (10 %). La gallinaza provee aproximadamente 34,7 kg/ton de nitrógeno, 30,8 Kg/ton de fósforo (P_2O_5) y 20,9 Kg/ton de potasio (K_2O) (Estrada-Pareja, 2004). En la **figura 2** se presentan los tratamientos en los rectángulos azules (1 kg por subparcela). 2) Copolímero orgánico de material hidrorretenedor conocido como **Polyter®** (<https://polyter.com/es/polyter-gr.html>), cuyos productores reportan que contiene una pequeña cantidad de potasio, nitrógeno y fósforo, sin especificar el porcentaje. Este hidrorretenedor actúa como acondicionador del suelo. En la **figura 2 a y b**, los tratamientos se presentan en los rectángulos verdes (30 g por subparcela). 3) Control negativo, es decir, sin fertilizante orgánico ni hidrorretenedor (copolímero), el cual se indica en la **figura 2 a** con rectángulos rosados.

Tratamiento de árbol acompañante (subparcelas)

Dentro de cada parcela se establecieron tres subparcelas (unidad experimental: UE), con una separación de 1 m entre sí. En cada subparcela de 30 cm x 40 cm se cavó un hueco de 30 cm de profundidad en el que se sembraron las plántulas. En todos los huecos se habían aplicado previamente 300 g de cal agrícola (marca Calco®, registro de venta ICA 2881. <https://www.calco.com.co/>), con el fin de reducir la acidez del suelo. Un mes antes de iniciar el experimento el suelo registraba un pH entre 4,72 y 5,46 según los análisis químicos realizados por Agrilab Laboratorios el 24 de mayo del 2017.

A cada subparcela se le asignó aleatoriamente (aleatorización estratificada) uno de los siguientes tres tratamientos de acompañante del cafeto “foco” y se midieron todas las variables de respuesta: 1) guamo, es decir, un cafeto acompañado por una plántula de *I. densiflora* de tres meses de edad sembrada a 20 cm de distancia (en adelante “Inga” o “guamo”); 2) cafeto, o sea, un cafeto foco cuyo acompañante fue otro cafeto (en adelante “cafeto”), y 3) control, un cafeto foco sin acompañante (control absoluto, en adelante “control”). Una vez instalado el experimento, se regó con igual cantidad de agua (2 L por UE) cada tres días entre el 9 de julio y el 16 de septiembre de 2017.

En el momento del trasplante y el establecimiento del experimento (tiempo cero) y cada mes durante un año (once eventos referenciados así: durante el 2017, en agosto 12, septiembre 15, octubre 21, noviembre 25 y diciembre 22, y durante el 2018, en enero 26, marzo 2, abril 7, mayo 1, junio 11 y julio 15), se tomaron las siguientes medidas en las plántulas: diámetro (cm) del tallo a 1 cm del suelo (o diámetro a la altura de la base) medido con un calibrador pie de rey digital (6”/0,01mm) marca Mitutoyo (Ref 500-196-30); altura (cm) desde el suelo hasta el meristemo apical; número de hojas (hasta el séptimo mes), y contenido relativo de clorofila a los seis meses de edad.

Las plántulas se sembraron entre el 7 y 8 de julio de 2017 y en julio 28 se tomaron datos de la cobertura vegetal del dosel con un densiómetro esférico (Model C) para corroborar que las condiciones de los tratamientos eran similares; se registró un porcentaje muy bajo de cobertura del dosel de 6,93 % (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>). Seis meses después, se midió el contenido relativo de clorofila en las hojas, el cual es un indicativo del estado nutricional de la planta con relación al nitrógeno (Ribeiro da Cunha, *et al.*, 2015). Para este fin, se determinó el índice de clorofila por medio de un clorofilómetro portátil Minolta SPAD-502, el cual evalúa la intensidad del verde de la hoja (650 a 940 nm) sin dañarla. Se obtuvieron medidas de dos hojas seleccionadas al azar en cada planta. La medición se hizo el 22 de diciembre del 2017 y se expresó en unidades SPAD.

Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los factores fijos, es decir, el tratamiento (control, copolímero y gallinaza (Estrada-Pareja, 2004); el acompañante del cafeto foco (solo, café o guamo),

así como la posible interacción entre estos factores a lo largo del tiempo en cuanto a las variables de diámetro y altura de los cafetos, se emplearon modelos lineales mixtos como alternativa de análisis en diseños experimentales factoriales con medidas repetidas (Gómez, *et al.*, 2019), combinando estructuras de correlación residual, heteroscedasticidad residual y efectos aleatorios, y seleccionando el mejor modelo mediante los criterios de verosimilitud penalizada (de información de Akaike, AIC, y de información bayesiano, BIC) y pruebas de cociente de verosimilitud. Se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey en los casos en que se evidenció un efecto significativo de alguno de los factores fijos asociados con el diseño experimental. Para la variable de hojas totales se empleó un modelo lineal generalizado mixto, con distribución de errores binomial negativa debido a la naturaleza discreta de la variable de análisis y la excesiva dispersión evidenciada. Para el análisis de la variable clorofila, medida en un solo momento, se empleó un modelo lineal mixto con distintas estructuras de varianza (homogénea y heterogénea). El análisis estadístico se hizo con el programa de libre distribución R, versión 4.0.3 (R Development Core Team, 2020), determinando un nivel de significación del 5 % para las diferencias estadísticas.

Resultados

En general, se encontró que las plántulas de café tuvieron un mayor crecimiento (estadísticamente significativo) con la gallinaza (Estrada-Pareja, 2004) que con el copolímero (<https://polyter.com/es/polyter-gr.html>) y el control negativo en todas las variables de respuesta, siendo estos últimos estadísticamente similares entre sí (Tabla 1; Figura 3). En cuanto al tratamiento del acompañante, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las variables medidas. A continuación se detallan los resultados para cada variable de respuesta.

Diámetro del tallo

El mejor modelo presentó una estructura de varianzas heterogéneas y de correlación residual no definida en el tiempo (Tabla 2S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>; modelo 9). El modelo indicó que la variabilidad del diámetro de los tallos de las plántulas de café aumentó en el tiempo (Figura 3a) y la correlación temporal no presentó una estructura definida, ya que la correlación disminuyó a medida que transcurría el tiempo, pero la correlación no permaneció constante entre instantes de tiempo consecutivos.

Mediante el análisis de varianza del modelo seleccionado se encontró un efecto significativo del tratamiento de fertilización, pero no hubo efecto estadístico del acompañante (Tabla 1a). Se evidenció también un efecto significativo de la interacción entre el tratamiento y el mes, lo cual sugiere que el diámetro de las plántulas de café cambió en el tiempo dependiendo solamente del tratamiento aplicado y no del acompañante.

Las pruebas de comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos para cada uno de los instantes de tiempo evaluados (material suplementario, tabla 3S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>) evidenciaron que, a partir del tercer mes de análisis, el tratamiento con gallinaza mostró diferencias con el control (gallinaza: media=4,64cm, desviación estándar (DE)=0,81cm; control: media=4,30cm, DE=0,78cm) y a partir del séptimo mes, con el copolímero (gallinaza: media=11,51cm, DE=2,58cm; copolímero: media=9,91cm, DE=2,60cm), en tanto que los tratamientos de control y copolímero presentaron diferencias significativas en los primeros meses (Figura 3A), las cuales se fueron atenuando con el paso del tiempo hasta que, a partir del sexto mes, dichas diferencias fueron insignificantes.

Altura de plántulas

Se encontró que el modelo más adecuado para representar el comportamiento de la altura de las plántulas de café fue el modelo lineal con estructura de varianzas heterogéneas y correlación residual no definida en el tiempo (material suplementario, tabla S4, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>; modelo 9).

Tabla 1. Análisis de varianza para las variables: **a)** diámetro de tallos, **b)** altura de plántulas, **c)** hojas totales y **d)** clorofila

a) Diámetro de tallos		
Fuente de variación	Estadístico F	p
Tratamiento de fertilización	29113,15	0,0433*
Acompañante	3,14	0,2226
Mes	1,50	<0,0001*
Tratamiento*Acompañante	1073,34	0,9595
Tratamiento*Mes	0,16	<0,0001*
Acompañante*Mes	3,96	0,1024
Tratamiento*Acompañante*Mes	1,39	0,3891
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
b) Altura de plántulas		
Fuente de variación	Estadístico F	Valor-p
Tratamiento de fertilización	6,60	0,0014*
Acompañante	0,90	0,4078
Mes	373,61	<0,0001*
Tratamiento*Acompañante	0,83	0,5043
Tratamiento*Mes	4,72	<0,0001*
Acompañante *Mes	1,23	0,2103
Tratamiento*Acompañante*Mes	1,06	0,3631
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
c) Hojas totales		
Fuente de variación	Estadístico	Valor-p
Tratamiento de fertilización	36,53	1,17x10 ⁻⁸ *
Acompañante	3,85	0,1457
Mes	4132,13	<2,20x10 ⁻¹⁶ *
Tratamiento*Acompañante	2,17	0,7045
Tratamiento*Mes	148,72	<2,20x10 ⁻¹⁶ *
Acompañante *Mes	18,71	0,0957
Tratamiento*Acompañante*Mes	12,24	0,9771
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
d) Clorofila		
Fuente de variación	Estadístico F	Valor-p
Tratamiento	5,49	0,0046 *
Acompañante	0,49	0,6099
Tratamiento*Acompañante	0,03	0,9984
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		

En la **tabla 1b** se presenta el análisis de varianza del modelo seleccionado, el cual evidenció un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) del tratamiento de fertilización y de la interacción entre tratamiento y mes, como ocurrió con la variable de diámetro del tallo, lo cual sugiere que la altura de las plántulas de café aumentó en el tiempo dependiendo solamente del tratamiento de fertilización utilizado y no del acompañante.

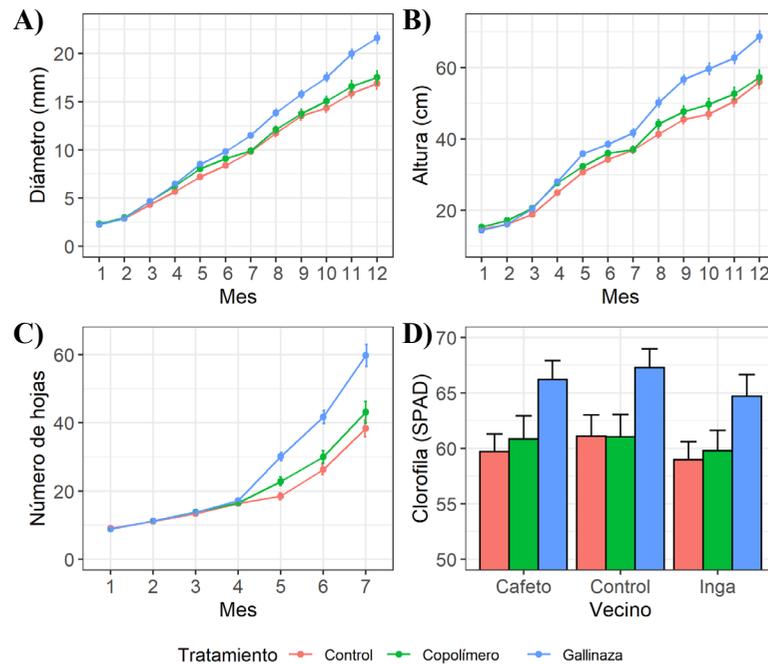


Figura 3. Gráfico de medias con errores estándar para: **a)** diámetro de los cafetos foco según tratamiento de fertilización; **b)** altura de plántulas según la fertilización; **c)** número de hojas totales según el tratamiento; **d)** cantidad de clorofila según el tratamiento. Colores: azul indica gallinaza; verde indica copolímero, y rosado indica control.

Las pruebas de comparación múltiple de Tukey (**Tabla S5**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>) entre los tratamientos para cada uno de los momentos evaluados evidenciaron que, a partir del cuarto mes, el tratamiento con gallinaza difirió del control (gallinaza: media=28,06cm, DE=5,31cm; control: media=24,94 cm, DE=4,76 cm); lo mismo sucedió entre los tratamientos de gallinaza y copolímero a partir del séptimo mes de análisis, presentando mayores alturas medias el tratamiento con gallinaza (gallinaza: media=43,02 cm, DE=16,66 cm; copolímero: media=37,02 cm, DE=8,80cm) (**Figura 3b**). Entre el control y el copolímero solamente se observaron diferencias significativas en el tercer mes de análisis (copolímero: media=27,69 cm, DE=4,69 cm; control: media=24,94 cm, DE=4,76 cm).

Hojas totales

El análisis de varianza del modelo lineal generalizado mixto con distribución de errores binomial negativa evidenció un efecto marcadamente significativo del tratamiento de fertilización, siendo mayor para la gallinaza, pero también de la interacción entre tratamiento y mes (**Tabla 1c**, **Figura 3c**), lo cual indica que el número total de hojas en las plántulas de café cambió en el tiempo dependiendo del tratamiento aplicado y no del acompañante. Las pruebas de comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos en cada uno de los momentos evaluados (**Tabla S6**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>) mostraron que a partir del quinto mes hubo una diferencia entre los tratamientos analizados (gallinaza: media=30,1, DE=11,4; copolímero: media=22,8, DE=12,0; control: media=18,5, DE=9,7). En los dos últimos meses de evaluación (mes 6 y 7) se presentaron diferencias significativas entre el control y el copolímero con el tratamiento de gallinaza, el cual produjo una mayor la cantidad de hojas (**Figura 3c**).

Cantidad relativa de clorofila

Según el AIC y el criterio de probabilidad logarítmica (*log-likelihood*), el mejor modelo encontrado presentó un efecto aleatorio debido a las dos mediciones realizadas en cada

plántula de café (dos hojas) y una estructura de varianza heterogénea debida a la interacción entre los factores de tratamiento y acompañante (**Tabla S7**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>). El modelo seleccionado indicó que la clorofila cambió según el tratamiento (**Tabla 1d**), presentándose mayor cantidad de clorofila media con la gallinaza (media=66,07, DE=12,10) que con el control (media=59,92, DE=12,26; prueba post-hoc: $p=0,0084$) y el copolímero (media=60,56, DE=14,77; prueba *post hoc*: $p=0,0190$), sin diferencias significativas entre estos dos últimos (prueba *post hoc*: $p=0,9439$) (**Figura 3d**).

Discusión

Contrario a la hipótesis planteada, la presencia de plántulas de guamo no tuvo ningún efecto sobre el crecimiento de las plántulas de café. Más aún, no se observó un efecto estadísticamente significativo durante el primer año de crecimiento cuando la planta adyacente o acompañante era otra plántula de café ni al contrastarlo con el café solo. Este es un hallazgo notorio dado que se podría esperar un crecimiento mayor de la plántula de café sin planta acompañante.

Este resultado sugiere que, durante el primer año de crecimiento, las plántulas de café no se ven afectadas ni por la presencia de un congénere, que podría estar generando competencia intraespecífica, ni por la de una leguminosa de crecimiento rápido como lo es el guamo, lo que podría estar causando competencia interespecífica o facilitación (**Vandermeer**, 1989). La competencia por recursos (luz, nutrientes) puede inhibir el crecimiento de las plantas cuando interactúan agrónomicamente, en tanto que la facilitación puede favorecerlas (generación de un ambiente propicio por parte de la planta acompañante) (**Vandermeer**, 1989).

Efecto de la planta acompañante

A lo largo del año de mediciones no se registró ningún efecto por la presencia de la planta acompañante sembrada a 20 cm de distancia. El experimento se dio por terminado después de un año porque, con el crecimiento de los cafetos y los guamos comenzó la sobreposición de doseles y en los siguientes meses las unidades experimentales (es decir, el café y su acompañante, y los bloques de fertilización diferencial) dejarían de ser independientes (**Figura 1b**).

Este resultado neutro, a pesar de no respaldar la hipótesis inicialmente enunciada, apoya la idea de que es razonable sembrar árboles de *I. densiflora* durante el establecimiento del cultivo del café a partir de la plántula, pues no afecta su desarrollo por competencia interespecífica. Más aún, esta ausencia de efecto durante el primer año podría convertirse en ventaja a largo plazo por diversas razones. Primero, se ha demostrado que las dinámicas hidrológicas cuando hay árboles favorecen la resiliencia de los cafetales (**Gaitán, et al.**, 2016), el uso y el drenaje del agua, lo que disminuye el estrés por agua (**Cannavo, et al.**, 2011) en los cafetales neotropicales, que suelen ser dependientes de la lluvia. Segundo, a nivel nutricional, la ventaja aumenta cuando se establecen las asociaciones mutualistas del guamo con bacterias fijadoras de nitrógeno (**Bianco**, 2020) y con micorrizas, lo que permite una mejor incorporación de nutrientes en el suelo (**Picone**, 2002). El guamo establece relaciones simbióticas facultativas con microorganismos, aumentando la nodulación por bacterias, especialmente cuando la disponibilidad de nitrógeno es baja (**Batterman, et al.**, 2013). La planta también puede invertir metabolitos para producir exudados de fosfatasas extracelulares y para establecer relaciones con simbiontes micorrícicos, pero está limitada por la disponibilidad de fósforo (**Batterman, et al.**, 2013).

Se ha demostrado que el guamo en los cafetales produce un mayor porcentaje de nitrógeno total en el suelo circundante (2,3 % *I. micheliana* vs. 1,8 % *Alchornea latifolia*) (**Aponte-Rolón**, 2018), y en su presencia ocurren menores tasas de relación carbono/nitrógeno (C:N) (20 en *I. micheliana* Vs. 27 en *A. latifolia*), lo que podría favorecer los cafetos adyacentes (**Aponte-Rolón**, 2018). El beneficio para las características del suelo en cafetales con sombra de guamo fue demostrado por **Cardona-Calle & Sadeghian-**

Khalajabadi (2005) en siete departamentos cafeteros de Colombia (Antioquia, Caldas, Cauca, Huila, Quindío, Tolima y Valle), donde se encontró una mayor cantidad de materia orgánica, porosidad, humedad, y menor compactación (resistencia a la penetración, menor densidad aparente) que en los cafetales establecidos a pleno sol (libre exposición), aunque en estos últimos hubo mayores contenidos de azufre y potasio. Cabe anotar que en los resultados de estos autores (2005) se registraron valores muy fluctuantes de las variables descritas en los diferentes departamentos cafeteros colombianos (**ver las tablas 2-4 y las figuras 2-8** de los datos reportados por estos autores). Los árboles acompañantes se convierten en fuente constante de hojarasca y, en ocasiones, de flores y frutos, que, al caer, forman un colchón en el suelo (**Muñoz-Gómez**, 2012), favoreciendo el agroecosistema. **Osorio-Moreno** (2004) encontró que la mineralización de nitrógeno a partir de hojas verdes de guamo (*I. densiflora*) por semana fue de 19,40 mg N/kg de suelo, una de las mayores de siete especies de árboles acompañantes de cafetales en Costa Rica (*Erythrina poeppigiana*, *I. edulis*, *Cordia alliodora*, *Eucalyptus deglupta*, *I. densiflora*, *Terminalia amazonia*, *T. ivorensis*) y este mismo valor en la hojarasca de *I. densiflora* fue de 3,93 mg N/kg, una de las mayores después de *I. edulis*. La descomposición lenta de este colchón de hojarasca asegura un constante suministro de nutrientes para los cafetos.

A largo plazo, la presencia de *I. densiflora* en cafetales puede proveer múltiples beneficios sociales, así como para la fauna silvestre y el ambiente. El guamo provee un microclima amortiguador para los cafetos y contribuye con un 60 % de la biomasa total, sin disminuir la producción si se maneja la poda adecuadamente (**Siles & Harmand**, 2010). En Ecuador se encontró que el mayor crecimiento (diámetro y altura) del café se presentó en combinación con *I. edulis* (**Muñoz-Gómez**, 2012). Además, se demostró que este agroforestal es de mucha importancia como sumidero de carbono, como se demostró en Costa Rica cuando el depósito de carbono en siete años de establecimiento de cafetales con *I. densiflora* fue 2,57 veces mayor que en los cafetales sin árboles (**Hergoulac'h, et al.**, 2012), caso en que el agroforestal presentó 25,2 mg de carbono por ha. Para enero del 2021, después de tres años y medio de establecido el experimento del presente estudio, se observó un crecimiento de los árboles de aproximadamente 5 m y ninguno de los árboles de *I. densiflora* murió (**Figura 1b**), aunque sí 16 cafetos de control sin fertilización y con copolímero (a partes iguales). No se conoce la causa de la muerte de estos cafetos.

Efecto de la fertilización

El crecimiento significativamente mayor de las plántulas con gallinaza es congruente con la hipótesis inicial y coincide con lo reportado en otros estudios (**Ávila-Reyes, et al.**, 2010; **Ridwan-Lubis, et al.**, 2017; **Tipan-Tuinga**, 2017). La gallinaza es uno de los abonos orgánicos más comúnmente utilizados por los pequeños campesinos en cultivos como el maíz y el frijol (**Armbrecht, et al.**, 2011) en la zona de estudio. Este abono consiste de excretas de gallinas mezcladas con cascarilla de arroz (ocasionalmente viruta de madera) que no se ha sometido a compostaje cuando se adquiere. Sus propiedades físicas tienen efecto en el suelo, con un nivel alto de materia orgánica (43-68 %) (**Tipan-Tuinga**, 2017), una densidad de aproximadamente 0,33 g/cm³, un 41 % de cenizas, capacidad de retención de humedad de 169 %, y pH de 7,4 (**Estrada-Pareja**, 2004); además, la composición química de la gallinaza provee aproximadamente 1,9 a 2,9 % de nitrógeno total (**Estrada-Pareja**, 2004; **Tipan-Tuinga**, 2017), 1 % de fósforo total y 1,2 % de potasio, siendo la relación carbono/nitrógeno de 10,1 %, y la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) de 35 meq/100 g, la cual se considera alta.

El aporte de gallinaza, por lo tanto, favorece el crecimiento del café. Se ha encontrado que la mezcla óptima de gallinaza con suelo es de 20-25 % de volumen de gallinaza para café en almacigo, lo que resulta en un mayor peso seco de las plántulas de café (**Ávila-Reyes, et al.**, 2010). El volumen relativo de gallinaza aplicado en el presente estudio fue menor, entre 5 y 10 %, y no se aplicó en almacigo, por lo que no es comparable.

Un resultado notable de este estudio fue la ausencia de diferencias entre el copolímero orgánico y el control, pues se esperaba un mayor crecimiento de las plántulas con este

producto, resultado que se explicaría por dos razones. Primero, porque no hubo estrés hídrico durante el estudio y el copolímero hidratado está diseñado para contrarrestarlo (no se cuantificó la precipitación, pero hubo por lo menos un evento de lluvia cada semana a partir de septiembre 16). El copolímero es un acondicionador orgánico que se hidrata y permite que la raíz absorba agua directamente al entrar en su contacto, por lo que es beneficioso cuando se presenta estrés hídrico, y este no fue el caso durante el experimento, y, por consiguiente, las raíces no necesitaron crecer buscando la humedad que provee el copolímero hidratado (**Figura 2b**). La segunda razón es que el suelo del lote experimental era ácido, con un pH de menos de 5,0 (los valores <5,5 se consideran extremadamente ácidos) y poca materia orgánica (1,93 % en promedio, n=15 muestras) y el copolímero es más un coadyuvante o acondicionador del suelo que un fertilizante, aunque, según el proveedor, puede suministrar pequeñas cantidades de nitrógeno fósforo y potasio (el proveedor no especifica las cantidades). Es de anotar que es posible que la cantidad aplicada no haya rebasado las necesidades de las plántulas.

Conclusiones

Durante el primer año de crecimiento de las plántulas de café en un suelo ácido de la zona cafetera del suroccidente colombiano, la presencia de *I. densiflora* no inhibió su crecimiento, pero tampoco lo favoreció. La fertilización orgánica con gallinaza, por el contrario, produjo un impacto positivo muy notable sobre el crecimiento de las plántulas de café, algo que no se evidenció con la dosis aplicada del copolímero hidratante acondicionador.

Agradecimientos

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a Manuel Antonio Velasco, Nelly Velasco-Otero y Florentino Puní, por su invaluable ayuda en todas las labores de campo; a Gerardo Peñaranda, por su contribución logística a lo largo de la investigación; a la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle, por la pasantía de semillero de investigación concedida a Nicole Vargas-García; al laboratorio de imágenes del Postgrado en Ciencias-Biología, a cargo de Juan Felipe Ortega, por la labor de ajuste de las figuras y fotografías, y al Programa Nacional de Ciencias Básicas de Colciencias (contrato RC. No. 0648-2013), por el apoyo financiero.

Información suplementaria

Tabla 1S. Promedio del porcentaje de cobertura vegetal. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 2S. Modelos considerados para el análisis de la variable de diámetro de tallos. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 3S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de diámetro de tallos. Ver tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 4S. Modelos considerados para el análisis de la variable de altura de las plántulas. Ver tabla 4S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 5S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de altura de las plántulas. Ver tabla 5S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 6S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de hojas totales. Ver tabla 6S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 7S. Modelos considerados para el análisis de la variable clorofila. Ver tabla 7S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Contribución de los autores

IA: diseño y establecimiento del experimento, recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito. WT: establecimiento del

experimento, análisis estadístico, recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito. NVG: recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Alvarado, G., Cortina H.A., Posada, H.E.** (2005). Castillo: nueva variedad de café con resistencia a la Roya. *Avances técnicos Cenicafé*. **337**: 1-8. ISSN - 0120-0178.
- Aponte-Rolón, B.A.** (2018). Effects of quality of leaf litter on ant assemblages in a shade-grown coffee agroecosystems in Chiapas, México. MSc. Thesis. University of Michigan. School for Environment and Sustainability, Ann Arbor, MI, U.S.A.
- Arenas-Clavijo, A. & Armbrrecht, I.** (2019). Soil ants (Hymenoptera: Formicidae) and ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in a coffee agroforestry landscape during a severe-drought period. *Agrofor. Syst.* **93** (5): 1781-1792. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0283-x>
- Armbrrecht, I., Ascúntar-Osnas, O., Daza, M., Galindo, V., Giraldo, C., Henao, N., Montoya-Lerma, J., Peña, I., Ramos, M., Reyes, A., Sanabria, C.** (2011). Influencia de dos acondicionadores orgánicos del suelo sobre el crecimiento de un policultivo de maíz y frijól. *Rev. EIDENAR*. **10**: 93-100.
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J., Morales, C.** (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* **7**: 303-321. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Ávila-Reyes, W.E., Sadeghian-Khalajabadi, S., Sánchez-Arciniegas, P.M., Castro-Franco, H.E.** (2010). Respuesta del café al fósforo y abonos orgánicos en la etapa de almácigo. *Cenicafé*. **61** (4): 358-369.
- Batterman, S.A., Wurzburger, N., Hedin, L.O.** (2013). Nitrogen and phosphorus interact to control tropical symbiotic N₂ fixation: a test in *Inga punctata*. *J. Ecol.* **101**: 1400-1408. Doi: [10.1111/1365-2745.12138](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12138)
- Bentley, J.W., Boa, E., Stonehouse, J.** (2004). Neighbor trees: shade, intercropping and cacao in Ecuador. *Hum. Ecol.* **32**: 241-270. Doi: [10.1023/B:HUEC.0000019759.46526.4d](https://doi.org/10.1023/B:HUEC.0000019759.46526.4d)
- Bianco, L.** (2020). Principales aspectos de la nodulación y fijación biológica de nitrógeno en Fabáceas. *IDESIA*. **38** (2): 21-29.
- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.-M., Siles, P., Dreyer, E., Vaast, P.** (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric., Ecosyst. Environ.* **140**: 1-13. Doi: [10.1016/j.agee.2010.11.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005)
- Cardona-Calle, D.A. & Sadeghian-Khalajabadi, S.** (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*. **56** (4): 348-364.
- Chait, G.** (2015). Capítulo 16. Café en Colombia: servicios ecosistémicos, conservación de la biodiversidad. En F. Montagnini, E. Somarriba, E., Murgueitio, H., Fassola y B. Eibl. (Eds.) *Sistemas Agroforestales, Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica 402*, CATIE, Turrialba, Costa Rica (349-362). Cali, Colombia: Editorial CIPAV.
- DaMatta, F.** (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* **86**: 96-104. Doi: [10.1016/j.fcr.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001)
- Estrada-Pareja, M.N.** (2004). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Rev. Lasallista Invest.* **2** (1): 43-48.
- Gaitán, L., Armbrrecht, I., Graefe, S.** (2016). Throughfall and soil properties in shaded and unshaded coffee plantations and a secondary forest: a case study from Southern Colombia. *J. Agric. Rural Dev. Trop. and Subtrop.* **117** (2): 309-321.
- Gómez, S., Torres, V., Medina, Y., Rodríguez, Y., Sardiñas, Y., Herrera, M., Rodríguez, R.** (2019). Aplicación del modelo lineal mixto y lineal generalizado mixto, como alternativas de análisis en experimentos con medidas repetidas. *Cuban J. Agric. Sci.* **53** (1):7-12.
- Groom, A.** (2012). *Inga densiflora*. The IUCN red list of threatened species 2012: T19892089A 20137776. Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019. Recuperado de: <https://www.iucnredlist.org/species/19892089/20137776>

- Hergoulac'h, K, Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., Harmand, J-M.** (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agric., Ecosyst. Environ.* **148**: 102-110. Doi: 10.1016/j.agee.2011.11.018
- Muñoz-Gómez, M.V.** (2012). Estudio del comportamiento vegetativo y rendimiento de café robusta (*Coffea canephora*), asociado con tres leguminosas forestales, guaba de bejuco (*Inga edulis*), guarango (*Parkia balsevii*), dormilón espinudo (*Piptadenia pterocladia*) establecido en el campo lago agrio de Petro producción. Trabajo de grado para Ingeniero agrónomo. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Osorio-Moreno, V.E.** (2004). Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis de MSc., CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Picone, C.** (2002). Managing mycorrhizae for sustainable agriculture in the tropics. En: J.H. Vandermeer (Ed.). *Tropical Agroecosystems* (95-129). U.S.A. CRC press.
- Rapidel, B., Allinne, C., Cerdán, C., Meylan, L., Virginio, E., Avelino, J.** (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. Capítulo 1, En F. Montagnini, E. Somarriba, E., Murgueitio, H., Fassola y B. Eibl. (Eds.) *Sistemas Agroforestales, Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales* (5-20). Serie técnica 402, CATIE, Turrialba, Costa Rica (349-362). Cali, Colombia: Editorial CIPAV.
- R Development Core Team** (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019. Recuperado de: <https://www.R-project.org/>
- Ridwan-Lubis, A., Mawarni, L., Sipayung, R.** (2017). Growth response of robusta coffee seedling to the application of chicken manure and liquid organic fertilizer. *J. Agroekoteknologi.* **5** (3): 692-696.
- Ribeiro da Cunha, A., Katz, I., de Pádua, A., Martínez, R.** (2015). Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *lisianthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *IDESIA.* **33** (2): 97-105. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000200012>
- Siles, P. & Harmand, J.** (2010). Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agrofor. Syst.* **78**: 269-286. Doi: 10.1007/s10457-009-9241-y
- Tipan-Tuinga, T.J.** (2017). Caracterización de la calidad del abono de aves de postura y de engorde (*Gallus gallos domesticus*), utilizado en la agricultura de San José de Puñachizag, Cantón Quero. Trabajo de grado Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cevallos, Ecuador.
- Urrutia-Escobar, X. & Armbrecht, I.** (2013). Effect of two agroecological management strategies on ant (Hymenoptera: Formicidae) diversity on coffee plantations in Southwestern Colombia. *Environ. Entomol.* **42** (2): 194-203. Doi: 10.1603/EN11084
- Vandermeer, J. H.** (1989). *The Ecology of Intercropping.* Cambridge University Press. Cambridge, U.K. p. 231.
- Vandermeer, J. H.** (2011). *The ecology of agroecosystems.* Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Massachusetts. 387p.