



---

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
LA SIERRA NORTE DE PUEBLA**

**DESARROLLO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)  
DE LA VARIEDAD MARSELLA MODULADO POR EL  
USO DE MICORRIZAS**

**ZAYNER EDIN RODRÍGUEZ FLORES**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA  
SUSTENTABLE**

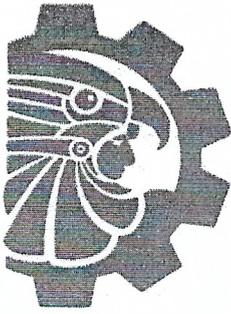
**ASESOR:**

**ING. YOANA NERI YOANA AGUILAR PANIAGUA**

**HEROICA CIUDAD DE ZACATLÁN, PUEBLA**

**2020**

---



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LA  
SIERRA NORTE DE PUEBLA**

La presente tesis titulada: **“DESARROLLO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) DE LA VARIEDAD MARSELLERA MODULADO POR EL USO DE MICORRIZAS”** realizada por el alumno: **ZAYNER EDIN RODRÍGUEZ FLORES** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**INGENIERO EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE**

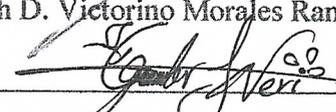
CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR DE TESIS:

  
\_\_\_\_\_

Ph D. Victorino Morales Ramos

ASESORA:

  
\_\_\_\_\_

Ph D. Noemi Yoana Aguilar Paniagua

COASESOR (A):

  
\_\_\_\_\_

Ing. Dolores Salazar Hernández

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme compartir este logro con mis padres, hermano y amigos de vida.

A mis padres Minerva y Primitivo por su apoyo incondicional en la vida, a su dedicación y esfuerzo amoroso hacia la familia y las enseñanzas que me dedicaron durante todo el proceso de esta travesía que comenzó desde el primer día de escuela. A todo ese impulso incansable y que día y noche lucharon con todas sus fuerzas para lograr ser los pilares que me sostuvieron durante mi formación.

A mi hermano Askel por la fortaleza que demostró durante todo este tiempo, gracias por la paciencia, comprensión y apoyo que le diste a mis padres cuando yo no estaba ahí.

A mi incondicional compañera en este viaje Yanet por su apoyo, soporte y consejos para poder levantarme cuando lo necesite y recordarme ser el mismo todos los días.

A todas las personas que me demostraron su sinceridad y apoyo cuando lo necesite.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla por ser mi casa de estudios durante estos 4 años y medio.

Al Colegio de Postgraduados Campus Córdoba por permitirme realizar la residencia profesional y abrirme las puertas de esa casa de estudios de la mejor manera posible.

A mi director de tesis Ph D Victorino Morales Ramos por sus enseñanzas, por permitirme realizar esta investigación bajo su tutela y por todas las facilidades y recursos para la realización del experimento.

A los miembros del Área de Ciencia y Tecnología del Café del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Ing. Juan, M.C. Iver, M.C. Ricardo, M.C. Mariela, Lic. Heziquio, Ing. Jose Luis y al M.C. Jose Luis por el trato y el cálido compañerismo durante mi estancia.

A la M.C. Beatriz Mariñez Yáñez por su asesoría y atención. Y desde luego por ser ejemplo y motivación de como continuar en el camino de la ciencia.

Al M.C. Fernando Reyes Gonzalez por su ayuda en el desarrollo del método alométrico para la medición del área foliar.

Al M.C. Eddi Feliciano Jiménez Ruiz por su tiempo y ayuda en el manejo de los estudios estadísticos.

A mis profesores de la carrera que me aportaron lo mejor de sí en cada una de sus clases.

## Contenido

INDICE DE CUADROS .....	5
INDICE DE FIGURAS .....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRAC .....	8
I.- INTRODUCCIÓN .....	9
II. OBJETIVOS .....	11
2.1 HIPÓTESIS .....	11
III.- REVISIÓN DE LITERATURA .....	12
3.1 Micorrizas .....	12
3.2 Bacterias Benéficas .....	14
3.3 Café.....	15
3.4 Características del café .....	16
3.4.1 Taxonomía.....	16
3.4.2 Fenología y morfología del cafeto .....	16
3.5 Principales Variedades.....	17
3.5.1 Variedad Marsellesa.....	18
3.6 Requerimientos minerales del cultivo.....	18
3.7 Importancia de los micronutrientes .....	19
3.8 Boro (B) .....	19
3.9 Manganeso (Mn) .....	20
3.10 Zinc (Zn).....	21
3.11 Estudios de micorrizas en café.....	22

3.12	Importancia del café .....	23
3.13	Retos.....	24
3.13.1	Cambio climático .....	24
3.13.2	El campo mexicano.....	24
IV.-	MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
4.1	Ubicación del experimento .....	25
4.2	Diseño experimental y de tratamientos .....	25
4.3	Material Vegetativo .....	30
4.4	Establecimiento del experimento.....	30
4.4.1	Preparación del sustrato.....	31
4.5	Inoculación de los consorcios micorrícicos .....	31
4.6	Fertilización .....	31
	33	
4.7	Variables evaluadas .....	33
4.9	Análisis de datos.....	34
V.-	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
5.1	Diagnostico químico del sustrato.....	34
5.2	Diagnóstico de niveles óptimos del material vegetativo.....	36
5.3	Estimación de crecimiento vegetativo.....	37
5.3.1	Modelo alométrico .....	37
5.3.2	Validación del modelo alométrico .....	39
5.4	Análisis de varianza (ANOVA).....	40
5.4.1	Análisis de variables.....	42
5.4.2	Análisis de relación entre variables .....	46
5.5	Fisiología del cafeto.....	48
5.5.1.	Coloración en hojas.....	48

VI.-CONCLUSIÓN .....	51
VII.-LITERATURA CITADA .....	52

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía del café (SCAA 2015; USDA 2019) .....	16
Cuadro 2. Niveles de fertilización. mL/L= miligramos por litro. ....	26
Cuadro 3. Composición de consorcios. C1: Consorcio número 1; C2: consorcio número 2; C3: Consorcio número 3 .....	26
Cuadro 4. Descripción de tratamientos. Zn: Zinc, Mn: Manganeso; B: Boro; -: Cantidad mínima; +: Cantidad máxima.....	27
Cuadro 5. Resultados de elementos obtenidos del análisis de sustrato por el laboratorio Fypa®. ....	34
Cuadro 6. Resultados de los niveles químicos de las muestras foliares por el laboratorio Fypa®. ....	36
Cuadro 7. Matriz de correlaciones de Pearson. ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, LHP: Largo de la hoja primaria, AHP: Ancho de la hoja primaria, AFE:Area foliar estimada, AFET: Area foliar estimada. ....	46
Cuadro 8. Matriz de significancia estadística. NA: No aplica, ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, LHP: Largo de la hoja primaria, AHP: Ancho de la hoja primaria, AFE:Área foliar estimada, AFET: Área foliar estimada total.....	47
Cuadro 9. Prueba de Bartlett de homogeneidad de varianzas. Se observa que la significancia observada (P-value) son mayores de 0.05, por lo que no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula (Ho) de que las varianzas son iguales. Comprobando que hay homogeneidad de varianzas entre las variables dependientes. ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, AFET: Área foliar estimada total, DF: Grados de libertad. ....	40
Cuadro 10. Análisis de varianza con una confiabilidad al 95 % Pr (<0 .05). ASA: Altura del Suelo al Ápice, GT: Grosor del Tallo, LR: Largo de Rama, NH: Numero de Hojas, AFT: Altura Foliar Total. ....	46

Cuadro 11. El Factor de Correlación entre las variables evidencia una alta relación entre el área foliar real y la expresión utilizada para estimar el área foliar. El valor muestra una alta interacción puesto que estadísticamente se considera el valor superior a .7.....	39
Cuadro 12. Observaciones correspondientes a las últimas 3 tomas de datos respecto a las coloraciones en las hojas. NC: No Contiene, C1:Consortio 1, C2:Consortio 2, C3:Consortio 3, X: Coloración presente. ....	49
Cuadro 13. Observaciones correspondientes a las 3 últimas tomas de datos respecto a las deformaciones en forma de corazón presentes en las hojas del café.....	49

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cultivares comunes de café y su clasificación ( <a href="http://scaa.org/index.php?goto=&amp;page=resources&amp;d=a-botanists-guide-to-specialty-coffee">http://scaa.org/index.php?goto=&amp;page=resources&amp;d=a-botanists-guide-to-specialty-coffee</a> ).....	17
Figura 2. Evolución de la coloración como síntoma de deficiencia de Boro (B).....	20
Figura 3. Coloración como síntoma de deficiencias de Manganeso (Mn) en el café.....	21
Figura 4. Deformación y coloración en hojas de café, como síntoma de deficiencia de Zinc (Zn).....	22
Figura 5. Lugar del experimento.....	25
Figura 6. Ubicación de los tratamientos dentro del experimento.....	29
Figura 7. Plantas de Café variedad Marsellesa antes de su plantación e inoculación.....	30
Figura 8. Adición del micronutriente Zinc, Boro, Manganeso (de izquierda a derecha) a la pipeta para posteriormente llenar el resto con agua. ....	32
Figura 9. Mezclas homogéneas de Zinc y Boro (de izquierda a derecha). ....	33
Figura 10. a: Prueba de campo para medir el pH del sustrato; b: Sustrato utilizado para el experimento; c: Se puede observar una medida de 5.5 en escala de pH en el potenciómetro sobre la muestra. ....	35
Figura 11. Cambio de la coloración en las hojas, excepto las del primer par. ....	50
Figura 12. Hojas con deficiencias la parte superior del arbusto.....	50
Figura 13. Color de hojas que presentaron clorosis en tomas de datos anteriores.....	50

# **DESARROLLO DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) DE LA VARIEDAD MARSELLERA MODULADO POR EL USO DE MICORRIZAS.**

Zayner Edin Rodriguez Flores

## **RESUMEN**

El Café (*Coffea arabica* L.) es un producto de importancia nacional e internacional, generador de una importante cantidad de empleos desde el nivel primario hasta secundario. A nivel mundial es una de las mayores mercancías generadoras de divisas por exportaciones e importaciones solo después del petróleo. Sin embargo, en países como México la producción ha sido afectada por el abandono del cultivo debido a los bajos precios de compra del café cereza, los altos precios de los fertilizantes y la falta de tecnificación a los huertos familiares. El uso de alternativas agroecológicas en el cultivo del café puede impactar directamente en el bolsillo del productor, disminuyendo el uso de fertilizantes. Las micorrizas son organismos mutualistas con la capacidad de aumentar significativamente la capacidad de la planta en la absorción, retención y asimilación de los nutrientes y del agua, mostrando desarrollos superiores a las plantas de interés no inoculadas. El objetivo de esta investigación fue medir el desarrollo foliar tras inocular consorcios microbianos micorrícicos adicionándoles Zinc, Boro y Manganeso en cantidades máximas y mínimas, correspondientemente al tratamiento en plantas de un año de edad de café (*Coffea arabica* L.) de la variedad Marsellesa sembradas en maceta bajo un sistema de sombra al 50 % por un periodo de estudio de 116 días. La evaluación del área foliar se realizó bajo un método no destructivo (modelo alométrico) y los resultados, tras este periodo de estudio, indicaron que no hubo diferencia significativa entre las combinaciones de los factores de estudio (tratamientos) para las variables estudiadas, dentro de estas el área foliar.

**Palabras clave:** Consorcio, Marsellesa, Microbiano, Mutualista, Simbiosis.

# **DEVELOPMENT OF COFFEE PLANTS (*Coffea arabica* L.) OF THE MARSELLESA VARIETY MODULATED BY THE USE OF MICORRIZES.**

Zayner Edin Rodriguez Flores

## **ABSTRAC**

Coffee (*Coffea arabica* L.) is a product of national and international importance, generating a significant number of jobs from primary to secondary level. Globally it is one of the largest foreign exchange generating merchandise for exports and imports only after oil. However, in countries like Mexico, production has been affected by the abandonment of cultivation due to the low purchase prices of cherry coffee, the high prices of fertilizers and the lack of modernization of home gardens. The use of agroecological alternatives in the cultivation of coffee can have a direct impact on the producer's pocket, reducing the use of fertilizers. Mycorrhizae are mutualistic organisms with the ability to significantly increase the capacity of the plant in the absorption, retention and assimilation of nutrients and water, showing higher development than uninoculated plants of interest. The objective of this research was to measure foliar development after inoculating mycorrhizal microbial consortia by adding Zinc, Boron and Manganese in maximum and minimum amounts, corresponding to the treatment in one-year-old coffee plants (*Coffea arabica* L.) of the Marseillaise variety planted potted under a 50% shade system for a study period of 116 days. The evaluation of the leaf area was carried out under a non-destructive method (allometric model) and the results, after this study period, indicated that there was no significant difference between the combinations of study factors (treatments) for the variables studied, within you are the foliar area.

**Keywords:** Consortium, Marseille, Microbial, Mutualist, Symbiosis.

## I.- INTRODUCCIÓN

A través del proceso fenológico, de las plantas requieren de distintos elementos químicos que les ayudan para el buen desarrollo. El nitrógeno, fósforo, y el potasio son los principales actores en el rol de la fertilización; el desempeño de cada uno de los elementos dentro de la planta es variable y en algunas situaciones trabajan de manera conjunta (TFI, 2014).

Las plantas comúnmente sufren de un suministro insuficiente por parte del suelo por lo cual se recurre al uso de fertilizantes. En cultivos extensivos como el de café, la fertilización es de manera convencional; es decir con el uso de químicos, aun así, en el café la fertilización con énfasis en los micronutrientes ha generado que se tenga registros de una buena producción y una buena calidad en taza. (Clemente *et al.*, 2018; Nuhu, 2014)

En la estructura del suelo, existen subsistemas que conjuntan a microorganismos, que pueden ser de utilidad, uno de ellos son los hongos micorrícicos (HM) capaces de crear una relación simbiótica entre huésped y hospedante, estos pueden encontrarse dentro o fuera de la raíz creando estructuras similares a haustorios (arbusculos o hifas enrolladas), al hacer esto crean un cambio en la composición del hospedante aumentando la capacidad de absorción de nutrientes en el suelo, presentan cambios en las concentraciones de compuestos que regulan el crecimiento como las auxinas, las citoquininas y las giberelinas a la par se presentan cambios en el fenotipo creando una mayor red radical capaz de explorar un mayor espacio de suelo como lo describen Rambelli (1973) y Linderman (1988) citados por (Bethlenfalvay, *et al*2013) en consecuencia a la mayor capacidad radical, mayor será la fuerza de soporte de la planta, mayor crecimiento y mayor capacidad de absorción los elementos que se encuentran en el suelo.

Los hongos micorrícicos han sido estudiados por la capacidad de extender la raíz en proporciones significantes a las que no fueron inoculadas con HM, la absorción de agua, fitorremediación y la absorción de nutrientes (Coninx *et al.*, 2017; Keymer *et al.*, 2017; Prasad *et al.*, 2017).

Para este experimento se evaluaron tres consorcios, un compuesto bacteriano, uno endomicorrícico y uno que tuviera tanto bacterias como endomicorrizas, para explorar la

relación entre HM y las raíces de las plantas puesto que contribuyen a la nutrición, en particular a la absorción de nutrientes de baja movilidad de las soluciones del suelo como P, Zn y Cu, que se traducen en una mayor tolerancia de las plantas (Fernandes *et al.*, 2016).

Uno de los elementos que mayor se han estudiado es el fósforo, ya que las plantas lo necesitan en mayor cantidad, pero se encuentra disponible en pocas cantidades en el suelo, además el fósforo se encuentra de manera inmóvil, y la raíz tiene que llegar hasta él para absorberlo (Aguilera Gomez *et al.*, 2007).

La importancia de los hongos micorrícicos juega un papel protagónico en la agricultura sostenible sosteniéndose como principal vínculo el que se tiene de la planta al suelo ya que como agentes de transporte de nutrientes tienen un impacto en la conservación de suelo (Elliott, *et al.* 1988); es decir su nutrición.

El presente trabajo busca probar la hipótesis de que los consorcios micorrícicos desarrollaran un beneficio significativo y cuantificable y así poder estimar el porcentaje del desarrollo estructural de las plantas en un periodo de estudio de 112 días a partir de la inoculación, siembra y adición de micronutrientes al experimento estableciéndolos en maceta para poder observar de mejor manera el comportamiento de la simbiosis en un sustrato homogéneo usando una combinación de tezontle y estiércol bovino en proporciones 1:1 y bajo una cubierta de malla sombra al 50 por ciento.

El inicio de la investigación se centró en buscar la variedad de interés, las bases se establecieron en el potencial de la investigación a largo plazo. Se escogió la variedad arábica Marsellesa, con un alto potencial de rendimiento, susceptibilidad a nematodos y una calidad buena en taza, puesto que estos factores abren margen a estudiar el posible antagonismo que pudiese presentarse y la mejora de la calidad en taza debido a la absorción de nutrientes y al mayor desarrollo de los cafetos.

## **II. OBJETIVOS**

### **a) Objetivo General**

Comparar el efecto de tres consorcios de microorganismos con diferentes dosis de micronutrientes en el desarrollo fenológico en plantas de café (*Coffea arabica* L.) bajo malla sombra.

### **b) Objetivos Específicos**

- Establecer el diseño experimental para realizar la evaluación de micronutrientes sobre el desarrollo de plántulas de café de la variedad Marsellesa.
- Realizar las mediciones de las variables del suelo y planta para determinar el desarrollo de las plantas de café.
- Realizar el análisis de los datos para determinar el área foliar y poder comparar el crecimiento vegetativo entre tratamientos.

## **2.1 HIPÓTESIS**

Todos los tratamientos que incluyen la inoculación con los consorcios micorrícicos tendrán mayor crecimiento que aquellos que no incluyen la inoculación, siendo el consorcio comprendido de hongos y bacterias (consorcio dos) el de mayor efecto en las plantas de café.

### III.- REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Micorrizas

Erróneamente en la vida cotidiana se menciona el termino micorriza como un organismo aislado que se puede extraer o reproducir, sin saber realmente lo que lo define. La palabra *mykorrhiza* proviene del griego que significa “hongo-raíz” acuñado por primera vez por el patólogo forestal Albert Bernand Frank (1885), (Aguilera Gomez *et al.*, 2007; Alberto *et al.*, 1991; Ballesteros Possú *et al.*, 2004; Bethlenfalvay *et al.*, 2013; Honrubia, 2009; van der Heijden *et al.*, 2015) el termino define al proceso ecológico que realizan ambas partes conjuntamente.

En este tipo de simbiosis el hospedero se alimenta de los nutrimentos sintetizados y a su vez contribuyen acarreado minerales que serán cedidos a la raíz del huésped. Una vez establecida la inoculación de estos hongos cambian la morfología de la raíz creando distintas estructuras que definen a los tipos de micorrizas (Keymer *et al.*, 2017).

La clasificación de las micorrizas que se utiliza actualmente por diversos autores (Aguilera Gomez *et al.*, 2007; Alberto *et al.*, 1991; Andrade-torres, 2010) es la misma descrita por Harley y Smith en 1983 y refrendada por Smith y Read en 1997, y reconoce siete tipos de micorrizas en los cuales toma en cuenta la taxonomía del hongo o la planta que interviene en la formación de las estructuras en la raíz, así como las alteraciones morfológicas que dan paso a la nueva estructura. Catalogándolas en Micorriza arbuscular, Ectomicorrizas, Ectendomicorrizas, Micorrizas ericoide y Micorriza orquideoide. Aun así, la clasificación general de las micorrizas es conocida por la forma en la que modifica a la raíz, sumando la clasificación Ectendomicorriza a la lista que es un caso especial de simbiosis en la cual se modifica la raíz del hospedero formando vesículas y arbusculos al mismo tiempo que genera red de Harting (Dobo *et al.*, 2018) .

##### 3.1.1 Ectomicorriza

La ectomicorriza es atribuida a la formación de asociaciones simbióticas mutualistas con plantas leñosas como el pino, sauce, roble, entre otros. La principal característica que define a este tipo de asociación es la formación de una superficie intracelular conocida como la red

de Harting, que consiste en una serie de hifas ramificadas que se extiende por la superficie radical, esta formación igual conocida como manto es una formación parecida a una vaina densa hifal que rodea a la raíz (Efe *et al.*, 2016).

### **3.1.2 Micorriza arbuscular o endomicorriza**

También conocido como vesículo- arbusculares este tipo de micorriza es quizá el más extendido en aproximadamente el 80 por ciento de las plantas y descrito más de 200 especies de plantas en cuatro ordenes: Glomerales, Diversisporales, Paraglomerales y Archaeosporales; 11 familias y 17 géneros (Schüßler & Walker, 2010).

El nombre arbuscular refiere a que, en las células corticales de las raíces sus hifas forman estructuras que parecen tener forma de pequeños árboles microscópicos que son el sitio de los intercambios de nutrientes como el fósforo, carbono y agua entre hospedero y hospedante, en muchas ocasiones al colonizar la planta interiormente a la raíz desarrollan estructuras que reciben el nombre de vesículas, donde almacenan sustancias de reserva y algunas especies como la *Glomus intraradices* forman esporas (Jaramillo, 2011).

Las relaciones endomicorrícicas se caracterizan por una penetración de las células corticales por los hongos; es decir concreta una relación invasiva desde dentro de la raíz extendiendo las hifas del hongo hasta afuera de la raíz y esta simbiosis no se genera red de Harting ni manto (Camargo Ricalde *et al.*, 2012; Ferrera Cerrato & Alarcón, 2007).

### **3.1.3 Micorriza ericoide**

Es un caso de endomicorriza que se distingue por colonizar a las plantas del orden Ericales comúnmente llamados brezos y en ambientes ácidos e inhóspitos identificando al grupo hongo Ascomycotina (no Basidiomycotina), todas las especies de las familias *Ericaceae* (excepto por los géneros *Arbutus* y *Arctostaphylos*), *Epacridaceae* y *Empetraceae* forman micorriza ericoide (Sandoval & Ordoñez, 2013).

### **3.1.4 Micorriza orquideoide**

Este subtipo de endomicorriza penetra las células radicales y forma estructuras, pero se distingue de las demás por presentarse únicamente en orquídeas y los hongos que la forman

son del grupo Basidiomycotina (no Zigomicetos o Glomeromycota). La importancia de esta simbiosis yace en la dependencia de las orquídeas ya que estimula la germinación y el crecimiento de la plántula ya que en su fase de plántula son aclorófilas por tanto saprobias por lo que dependen directamente de las aportaciones del hongo (Andrade-torres, 2010; Beeckman, 2013).

### **3.1.5 Micorriza arbutoide**

Es un tipo de ectendomicorriza que penetra las células radicales y forma la red de Harting. Se presenta en plantas de los géneros *Arctostaphylos*, *Arbutus* y *Pyrola* integrantes del orden Ericales, comúnmente conocidas como madroños. (Camargo Ricalde *et al.*, 2012)

### **3.1.6 Micorriza monotropoide**

Ectendomicorriza que solo se establece en plantas de la familia *Monotropaceae* la cual contiene 10 géneros de plantas pequeñas completamente aclorófilas, por lo que dependen de la interacción del hongo para la obtención de los nutrientes (Rivera-Conde *et al.*, 2018)

## **3.2 Bacterias Benéficas**

Las bacterias benéficas actualmente son utilizadas en diversos cultivos, algunas especies utilizadas como controladores biológicos, fijadoras de nitrógeno o como promotores de crecimiento. *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis (Cmm)* y *Xanthomonas vesicatoria (Xv)* son enfermedades de importancia agrícola por ocasionar grandes pérdidas económicas a nivel mundial, el género *Pseudomonas* al ser inoculado desde la germinación protege de la incidencia de estos patógenos en este antagonismo se puede observar la interacción directa de esta bacteria. (Figueroa Hernández *et al.*, 2015)

La diversidad de las bacterias benéficas que podemos encontrar en el suelo es basta, los géneros *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus* y *Streptomyces* forman parte de la comunidad microbiana del jitomate y la agregación de manera artificial a los cultivos han resultado en un mayor crecimiento en defensas y desarrollo de la planta (Srinivasarao & Manjunath, 2017). *Trichoderma harzianum* es un hongo conocido por ser un controlador de agentes patógenos en distintos cultivos y eficiente al controlar en 100 % *Rhizoctonia solani* en

jitomate (Fernández Herrera *et al.*, 2007) evidenciando que las especies benéficas pueden ser diversas en el organismo del suelo y no se limitan a solo bacterias.

### 3.3 Café

El café es la bebida más consumida a nivel mundial, esta infusión preparada a base de granos del cafeto molidos previamente tostados es una de las bebidas más populares y más solicitada cada mañana en millones de hogares alrededor del planeta, lo que convierte al café en un producto de valor económico que genera altas divisas en exportaciones solo por debajo del petróleo (Montalvo & Monica, 2017).

Esta planta pertenece a la familia *Rubiaceae* tiene su origen etíope hace aproximadamente 300 años d. C. en la región oriental de África. La historia relata específicamente que tuvo su origen probablemente en la provincia de Kaffa siendo ahí donde inicialmente era consumida por el ganado caprino y por esclavos que eran transportados de lo que hoy día es Sudan a Arabia y Yemen por el puerto de Moca que era el más concurrido de la época ya que era la principal vía marítima a la Meca, lugar donde los árabes establecieron una rigurosa política de no exportar granos fértiles de café, para que no pudiese cultivarse en ningún otro lugar, aunque a pesar de los esfuerzos fue hasta el año de 1616 cuando los holandeses comenzaron a cultivarlos en invernaderos. En el año de 1683 se abrió la primera cafetería. En el continente americano el café se comenzó a cultivar hasta el año 1720 dividiendo su procedencia, una de estas fue llegando a Martinica estableciendo los cultivos en la región de Preebear mientras que los holandeses lo hicieron en la Guyana francesa y en Pará, Brasil, diez años más tarde los británicos llevaron el café a Jamaica (Montalvo *et al.*, 2017).

En México la planta de café tuvo su llegada en el año 1795 a Córdoba, Veracruz más tarde en 1823 se introdujeron a Michoacán y Chiapas (Figueroa Hernández *et al.*, 2015). Actualmente es cultivado por 12 estados bajo un sistema de sombra, liderado por Chiapas (34.8%), Veracruz (25.2%), Oaxaca y Puebla (28%) es decir; estos 4 estados contribuyen con un 88 % de la producción total nacional obteniendo el onceavo lugar en producción a nivel mundial con 835 mil toneladas para el año 2017 (CEFP, 2001; SIAP, 2018).

### 3.4 Características del café

#### 3.4.1 Taxonomía

##### Taxonomía del cafeto

Cuadro 1. Taxonomía del café (SCAA 2015; USDA 2019)

---

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliata</i>
Orden	<i>Rubiales</i>
Familia	<i>Rubiaceae</i>
Genero	<i>Coffea</i>
Especie	<i>arabica, canephora, liberica, etc.</i>

---

#### 3.4.2 Fenología y morfología del cafeto

El café es un cultivo perenne. Los arbustos necesitan de 2 a 5 años para la primera producción y miden de 2 a 4 metros de altura, Arabica puede ser económicamente productivas durante más de 30 años, mientras que Robusta hasta 60 años dependiendo de la variedad y del manejo agronómico especializado que se dé durante su vida, en la madurez tiene hojas aovadas, lustrosas y verdes que se mantienen durante tres a cinco años (Couto Júnior *et al.*, 2013).

Las hojas del café crecen en un peciolo en pares opuestos a los lados del tallo principal y las ramas. Las hojas de Arabica son más delgadas, suculentas y delicadas, mientras que las de Robusta son anchas y delgadas (Cannell, 1985).

Sus flores son blancas y fragantes y permanecen abiertas pocos días. 16 semanas después de que aparece la flor se desarrolla el fruto comenzando su transformación de color verde claro

a rojo, punto idóneo de su corte, en esta etapa al fruto se le conoce comúnmente como cereza, uva o capulín.(Indian Estates, 2010).

### 3.5 Principales Variedades

Una variedad es una clasificación específica contenida dentro de una especie; es decir que dentro de una especie podemos encontrar un número amplio de variedades (UPOV, 2019).

La descendencia por la que se obtuvo el café tal y como lo conocemos actualmente se generó de distintas vertientes (Ver Figura 1), dentro de los mismos cultivares del café siendo que las variedades existentes en Latinoamérica se originaron a partir de las variedades Typica y Bourbon, dando origen a nuevas variedades (Caturra, Mondo Novo, Catuaí, Pache, Villa

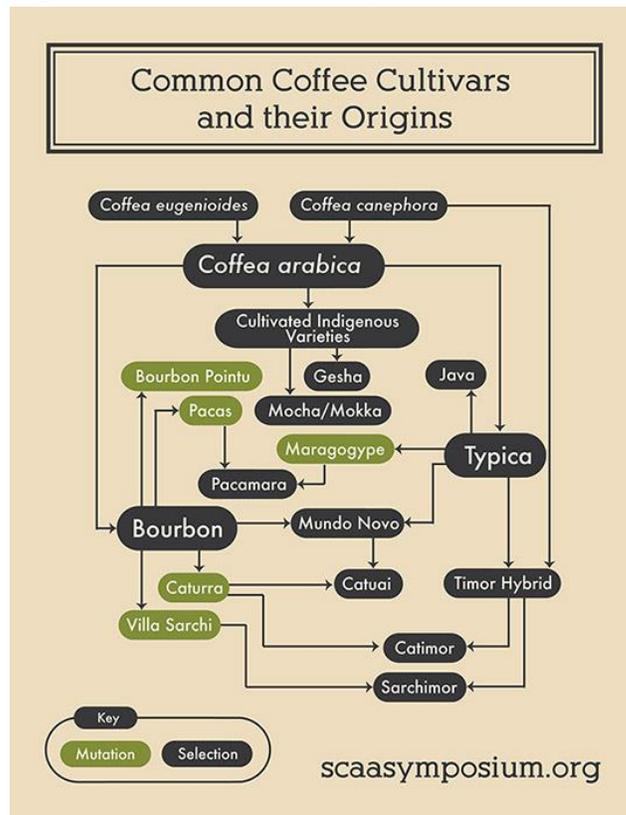


Figura 1. Cultivares comunes de café y su clasificación (<http://scaa.org/index.php?goto=&page=resources&d=abotanists-guide-to-specialty-coffee>).

Sarchí, Pacas, Maragogipe, entre otros) por medio de mutaciones naturales y retocruzadas inducidas (Velásquez O., 2019).

El género *Coffea* comprende de 124 especies la cuales solo dos son de importancia económica: *C. arabica* es la especie más producida en el mundo y aporta un 60 % de la producción total mundial y *C. canephora* también llamada robusta aporta el 40% de la producción mundial de café, produce una bebida de menor calidad que al del café arábico (Razafinarivo *et al.*, 2013; World Coffe, 2018) .

### **3.5.1 Variedad Marsellesa**

Desarrollada en el año 1959 por el CIFC, Oeiras, Portugal en fincas cafetaleras de Nicaragua (La Marsellesa, La Cumplida y Los Compadres) originado por un cruce de la variedad Villa Sarchí 971/10 y el Híbrido de Timor CIFC 832/2. Posteriormente se realizaron varias selecciones generacionales para la obtención de plantas con características agronómicas estables y fue hasta el año 2009 cuando se puso a disposición de la semilla con el nombre de variedad Marsellesa (Velásquez O., 2019).

A partir de cafetos Sarchimores, la variedad Marsellesa es una planta precoz que en condiciones normales empieza a producir a los 18 meses después de la siembra, de porte mediano con una alta productividad, con una producción promedio de 65 quintales (6500 kg.) de pergamino seco por hectárea, el tamaño de la cereza es grande en comparación con el de Caturra, pero más pequeño comparándolo con otros Sarchimores. Es resistente a roya (*Hemileia vastatrix*) y a nematodos del género *Meloidogyne*, pero es susceptible al ojo de gallo (*Mycena citricolor*), esta variedad ha tenido un desempeño en taza de calidad bueno con una calificación promedio de 81.3 puntos en análisis sensorial de taza en la escala establecida por la SCAA (World Coffe, 2018).

### **3.6 Requerimientos minerales del cultivo**

Para el cafeto los requerimientos se realizan en base a los niveles de fertilidad del suelo, edad de la planta y densidad de población. Aún con todos esos factores se recomienda generalmente una nutrición de 30 g. por planta de 15-15-15 de NPK (Nitrógeno + Fosforo + Potasio) para el primer y segundo año, 60 g de NPK para el tercer año, 90 g al cuarto año y 120 g al quinto año y en posteriores, aplicando en los meses cuando inician las lluvias (Abril/Mayo) Julio y Septiembre (FAO, 2017).

Los micronutrientes a pesar de que se requieren en pequeñas cantidades son esenciales ya que la ausencia afecta directamente al crecimiento y el rendimiento de las plantas. La aplicación de los micronutrientes se realiza principalmente cuando el suelo no cuenta con los niveles óptimos o cuando se hacen correcciones por la aparición de deficiencias en las plantas y generalmente se utiliza 500 g de sulfato de zinc, 50 g de molibdato de amonio y 100 de bórax o ácido bórico (Indian Estates, 2010).

### **3.7 Importancia de los micronutrientes**

Al igual que todas las plantas, el cafeto requiere de cantidades pequeñas de micronutrientes (B, Mg, Zn, Fe, Mn, Ca, S, Cu, Mb) que tienen efectos a corto y largo plazo en la planta, aunque en su mayoría las aplicaciones son solo para corregir la deficiencia en los suelos (Covre *et al.*, 2018). El café es cultivado en su mayoría en suelos con una baja disponibilidad de nutrientes y para la mayoría de las fertilizaciones ignorando a los micronutrientes conduciendo a la aparición de deficiencias en el cafeto con señales evidentes en las hojas presentando decoloraciones y deformaciones (Dubberstein *et al.*, 2019).

### **3.8 Boro (B)**

El boro es un micronutriente cuya movilidad es a través del agua por el xilema de la planta, las funciones de este elemento dentro del cafeto son principalmente fisiológicas y muy importantes, asociadas con las relaciones hídricas, acumulación de azúcares, metabolismo del nitrógeno, entre otros. Las deficiencias de este micronutriente son principalmente, la insuficiencia en el cuajado de los frutos, las plantas deficientes de boro muestran una alta acumulación de ácidos fenólicos, los cuales pueden causar necrosis y muerte, malformación de hojas y muerte de los tejidos meristemáticos en plantas, interpretándose en un problema de impacto para la producción de café (Rodrigues & Rodrigues, 2016; Santinato *et al.*, 2016). Las deficiencias pueden ser visibles en las hojas jóvenes, se identifican por un color verde claro y moteado (Ver Figura 2), el árbol produce ramas secundarias a los costados del árbol dando como resultado un arbusto deformado en forma de abanico (Hernández, 2009).

Respecto a un aumento mayor a 200 ppm de Boro (A. Vera, 2001), el cafeto comienza a presentar niveles de toxicidad que se pueden percibir a simple vista. Los excesos de este

mineral producen clorosis por el borde de la hoja avanzando hacia el centro, mientras la parte no afectada muestra un color verde oscuro. En partes de la hoja se visualiza amarillamiento posteriormente presenta necrosis, este síntoma puede ser confundido con la deficiencia severa de K, con la diferencia de que en tal deficiencia no se presentan los amarillamientos en los bordes de las hojas (Ramfrez, 1998).



Figura 2. Evolución de la coloración como síntoma de deficiencia de Boro (B).

### 3.9 Manganeso (Mn)

El manganeso además de ayudar en el metabolismo del nitrógeno, es reconocido como el metal activador de los metaloproteínas (reductasa del nitrito y de la hidroxilamina). Este metal es uno de los activadores enzimáticos para la normal ocurrencia del ciclo de Krebs. Además de ayudar en la respiración de las plantas en los cloroplastos actúa favoreciendo el mantenimiento de la estructura de la membrana (Hernández, 2009).

La deficiencia interfiere en la síntesis de la clorofila. Esta se puede identificar por una coloración verde oliva en las hojas, comenzando con las hojas de menor exposición solar y a medida que aumenta esta deficiencia el resto de la hoja se torna de color amarillo (Carvajal, 1984). (Ver Figura 3)

Cuando el nivel de manganeso es elevado, el café comienza a presentar excesos que afectan principalmente a las funciones fotosintéticas y enzimáticas. Presentando síntomas visuales como manchas marrones en las hojas maduras y puntos cloróticos en las hojas jóvenes. Los síntomas de toxicidad aparecen primero en las hojas más viejas extendiéndose desde el borde de las hojas hacia el centro (Sela, 2019).



Figura 3. Coloración como síntoma de deficiencias de Manganeso (Mn) en el café.

### 3.10 Zinc (Zn)

Este nutriente es un estabilizador de las fracciones ribosomales y promueve la síntesis de citocromo C. El zinc es responsable de la síntesis de la auxina, al actuar como activador de la enzima responsable de la formación del triptófano, el aminoácido precursor de la síntesis del ácido 3-indol acético (Carvajal, 1984) .

La deficiencia de este mineral se asocia con un crecimiento reducido de los frutos y de los arbustos, además que interfiere en la asimilación del fósforo. Muestra evidente de las deficiencias puede observarse en las hojas, ya que presentan alargamiento y las hojas se vuelven más delgadas, en casos más extremos estas presentan una clorosis severa y las hojas se vuelven muy quebradizas (Rosolem & Sacramento, 2001). (Ver Figura 4)

Cuando las cantidades de zinc dentro de una planta se exceden, la planta manifiesta de manera visible la toxicidad presentando clorosis, sin embargo, el exceso de este elemento crea dentro de la planta deficiencias de magnesio, fosforo y manganeso ya que el zinc compite con ellos (Amezcuca & LLra, 2017).



Figura 4. Deformación y coloración en hojas de café, como síntoma de deficiencia de Zinc (Zn).

### 3.11 Estudios de micorrizas en café

En suelos cafetaleros existe una gran diversidad de microorganismos del suelo gracias a los entornos donde se desarrolla este sistema agroforestal, para la población de hongos formadores de micorrizas esto resulta en una población amplia de especies, aun así existen variaciones que hacen que la población de estas bajen como la fertilidad de los suelos, cantidad de materia orgánica y pH (Posada *et al.*, 2018). Este sistema agroforestal, comprendido de la relación de un cultivo de porte bajo con árboles maderables incrementa la proliferación de esporas (Dobo *et al.*, 2018).

Posterior al descubrimiento de la simbiosis micorrícica se comenzó a realizar una interpretación de los atributos que aporta la simbiosis micorrícica y los cambios positivos que pudiesen generar en un cultivo de importancia. En huertos de café se encontraron asociaciones que mostraban cambios en el estado nutricional de la planta, se realizaron

evaluaciones en el comportamiento entre HMA (Hongos Micorrícicos Arbusculares) y patógenos como nematodos (Andrade *et al.*, 2009; Rivillas, 2003), en el desarrollo en plántula (Trejo *et al.*, 2011), así como el crecimiento de las plantas en vivero y en campo (Fernández Martín *et al.*, 2005) bajo algún tipo de inoculación micorrícica. Así mismo, las micorrizas en el cafeto han mostrado reducir los excesos minerales en plantas inoculadas a los que se puede encontrar bajo niveles altos en el suelo (Alecrim *et al.*, 2016).

Un factor importante en el buen desempeño de la inoculación es la especie de hongo formador de micorriza utilizado (HFM) realizando evaluaciones en indicadores como el desarrollo y crecimiento de la planta y en el porcentaje de colonización, las especies *Glomus fasciculatum*, *Glomus mosseae* (ecotipo1) y *Glomus intraradices* las más eficientes en estudios realizados en caturra rojo (*Coffea arabica* L.) (Sánchez *et al.*, 2006).

### **3.12 Importancia del café**

Para las poblaciones mexicanas que se encargan de la recolección, proceso y venta; es decir las familias involucradas en esta actividad, son influenciadas directamente ya que emplea a más de 500,000 productores en 14 entidades federativas y 480 municipios según los datos de la Planeación Agrícola 2017-2030 de la SAGARPA.

Económicamente el café es un cultivo de importancia que ha servido como impulso para países en desarrollo como es el caso de México con potenciales exportaciones por un valor estimado de 298.80 millones de dólares en 2016 y una estimación de 474.34 millones de dólares para 2018 (ICO, 2012).

En el ámbito ambiental el impacto que tiene este sistema agroforestal se refleja en la biodiversidad de la región, puesto que el café es un producto tropical importante es cultivado en zonas prioritarias para la conservación de la biodiversidad (Buechley *et al.*, 2015) de esta manera se crean microecosistemas que enriquecen a la supervivencia de especies, contrastando con sistemas de cafetales a cielo abierto o monocultivos (Ho *et al.*, 2017).

Como prueba al aumento o disminución de especies las mariposas pueden servir como un indicador de la riqueza de diversidad. De acuerdo con la investigación de (Jezeer & Verweij,

2015) la población de mariposas se presenta en un porcentaje significativo en cultivos de café orgánicos solo después de bosques con alta vegetación demostrando la influencia de la vegetación sobre la proliferación de especies.

### **3.13 Retos**

#### **3.13.1 Cambio climático**

El cambio climático es un problema de preocupación mundial que reduce la capacidad de los recursos naturales (biodiversidad, agua y suelo) para la producción de los alimentos necesarios para abastecer a una población que aumenta día a día (FAO, 2019). En el equilibrio natural que existe en los ecosistemas relaciona directamente el clima y la vegetación, y la falta de vegetación provoca cambios climáticos de diferentes escalas. El agroecosistema del café a sombra aporta recursos ambientales, económicos y sociales sin embargo la caída del precio en los últimos años ha provocado una disminución en el ámbito socioeconómico y de producción aumentando la deforestación causando cambios en los patrones de precipitación y la frecuencia de la aparición de niebla en las regiones cercanas a los cultivos (Loreto *et al.*, 2017).

El calentamiento de nuestro planeta afecta y seguirá afectando a los ecosistemas naturales y los controlados por el humano convirtiéndose una prioridad el estimar las pérdidas en productividad de los cultivos (Challinor *et al.*, 2009). Estos cambios en el planeta han repercutido en el café mexicano, en el estado de Veracruz para la próxima mitad del siglo se espera una reducción del 22-27% de la productividad del café debido a los cambios climáticos, incluido el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación (Gay *et al.*, 2004).

#### **3.13.2 El campo mexicano**

Uno de los problemas de mayor alcance en los últimos años ha sido la falta de tecnificación asistida por personal capacitado hacia productores. Actualmente el alcance de información en los cultivares mexicanos se esperaría tuviese un crecimiento dado la gran oleada de la tecnología. Chiapas es el primer productor de café en México y su café es reconocido por su calidad internacional, aun así, las personas que participan de manera importante sembrando,

recolectando y subsistiendo de esta actividad por su participación primaria, han sido identificados con una falta de tecnificación para el manejo del cultivo y de infraestructura que interrumpe el paso a satisfacer un mercado que busca calidad e inocuidad (Medina Meléndez *et al.*, 2016).

## **IV.- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 Ubicación del experimento**



Figura 5. Lugar del experimento.

El experimento se estableció en las instalaciones del Colegio de Posgraduados Campus Córdoba en el Área de Ciencia y Tecnología del Café, ubicada a 645 metros sobre el nivel del mar bajo las coordenadas 18°51'20.61 Latitud Norte y 96°51'37.59 Longitud Oeste. (Ver Figura 5)

### **4.2 Diseño experimental y de tratamientos**

Se evaluaron 28 tratamientos (Cuadro 4) utilizando como factores el consorcio micorrícico (Cuadro 1), el microelemento, dosis baja y alta del microelemento (Cuadro 2). Bajo un diseño experimental completamente al azar (DCA) (Figura 6) con 4 repeticiones y para los tratamientos del 17 al 22 se realizaron 3 repeticiones, empleando un análisis de varianza para casos desbalanceados.

Cuadro 2. Niveles de fertilización. mL/L= miligramos por litro.

<b>Cantidades</b>	<b>Manganeso (Mn)</b>	<b>Zinc (Zn)</b>	<b>Boro (B)</b>
Alta	6.40 mL/L	7.1 mL/L	3.33 mL/L
Baja	3.20 mL/L	3.57 mL/L	1.6 mL/L

Cuadro 3. Composición de consorcios. C1: Consorcio número 1; C2: consorcio número 2; C3: Consorcio número 3

<b>Consorcio</b>	<b>Producto comercial</b>	<b>Composición</b>
C1	Glumix	<i>Glomus geosporum</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. constrictum</i> , <i>G. tortuosum</i> , <i>G. Intraradices</i>
C2	Endospor	<u>Endomicorriza:</u> <i>Glomus intraradices</i> , <i>G. mosseae</i> , <i>G. brasilianum</i> , <i>G. clarum</i> , <i>G. deserticola</i> , <i>G. etunicatum</i> , <i>Gigaspora margarita</i> <u>Bacterias benéficas:</u> <i>Azospirillum brasiliense</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>
C3	BacPack	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. polymyxa</i> , <i>B. megaterium</i> ,

Cuadro 4. Descripción de tratamientos. Zn: Zinc, Mn: Manganeso; B: Boro; -: Cantidad mínima; +: Cantidad máxima.

<b>No. Tratamiento</b>	<b>Descripción de tratamientos (Consortio + Elemento)</b>
1	Testigo
2	C1
3	C2
4	C3
5	C1 + Zn+
6	C1 + Zn-
7	C2 + Zn+
8	C2 + Zn-
9	C3 + Zn+
10	C3 + Zn-
11	C1 + B+
12	C1 + B-
13	C2 + B+
14	C2 + B-
15	C3 + B+

---

16	C3 + B-
17	C1 + Mn+
18	C1 + Mn-
19	C2 + Mn+
20	C2 + Mn-
21	C3 + Mn+
22	C3 + Mn-
23	Zn+
24	Zn-
25	B+
26	B-
27	Mn+
28	Mn-

---

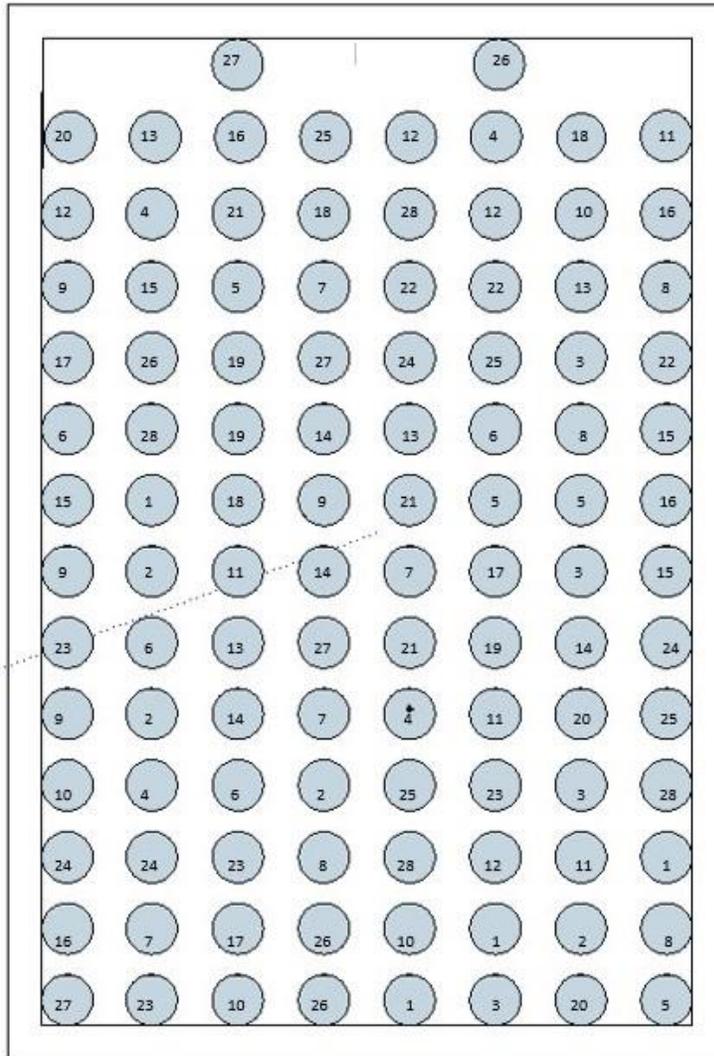


Figura 6. Ubicación de los tratamientos dentro del experimento.

### 4.3 Material Vegetativo

Las plantas de café (Figura 7) que se usaron para este experimento se adquirieron a una edad de 7 meses a través de la empresa proporcionados por la empresa AMSA, ubicada en Ixhuatlán del Café, Veracruz, las cuales se mantuvieron con riego diario hasta el día de siembra.



Figura 7. Plantas de Café variedad Marsellesa antes de su plantación e inoculación.

### 4.4 Establecimiento del experimento

La unidad experimental utilizada fue de 280 m<sup>2</sup>. El café se sembró bajo sombra con el uso de malla sombra al 50 % la cual se extendió y alzó por encima de postes de bambú de 2.5 metros, estos se colocaron a una distancia de otro de 4 metros sumando un total de 20, posteriormente se fijaron con alambre acerado a estacas en suelo y de un corte de bambú a otro para sumarle fuerza y resistiera el peso de la malla. Una vez puesta la malla se coció por los extremos con hilo de nailon a los alambres frontales del terreno.

Para el experimento se optó por el uso de macetas de poliuretano con capacidad de 178 litros las cuales se distribuyeron en marco real con una distancia de 1x1 m.

Para el trasplante fue necesario crear un mapa de ubicación de tratamientos en el que, de manera gráfica se marcaba que factor le correspondía a cada maceta.

#### **4.4.1 Preparación del sustrato**

El sustrato fue una mezcla de tezontle (TE) y composta bovina (COM) en una proporción 50 y 50 que aportó un espacio poroso total (EPT) de 60.3%, una capacidad de aeración (CA) de 26.5, y materia orgánica (MO) de 14.6 % de acuerdo con las investigaciones para la generación de sustratos hecha por (Crespo *et al.*, 2010).

La cantidad requerida para las 106 macetas sumó la cantidad de 2261 kg de composta y 7632 kg de tezontle. La mezcla se realizó de forma manual, con la mezcla resultante se realizó una evaluación del pH con ayuda de un potenciómetro en el que se obtuvo una cifra de 5,5 la cual fue la óptima y no se realizó ninguna enmienda al sustrato.

#### **4.5 Inoculación de los consorcios micorrízicos**

La inoculación se realizó al momento de la siembra, dos de los productos se adquirieron en presentaciones solubles (C2 y C3), y la inoculación se realizó mediante una inmersión de las plantas hasta cubrir por completo las bolsas en una solución de 30g/L de producto por 2 minutos y sembradas posteriormente.

Las plantas correspondientes a C1, fueron previamente sembradas, y la inoculación se realizó incorporando el producto alrededor de la zona de goteo, agregando 66 gamos del producto y regando con 250 mL de agua al finalizar.

#### **4.6 Fertilización**

La fertilización se efectuó en 3 fechas a lo largo del periodo de estudio, las cuales fueron al inicio, a mediados y final de este lapso. Usando productos comerciales ricos en estos elementos, líquidos para el Boro y Zinc y un producto soluble en Manganeso.

Con la ayuda de una jeringa de 3 mL, se extrajo de la botella la cantidad de producto correspondiente (Cuadro 2) (para las cantidades superiores de 3 mL, se realizó en dos partes a manera de completar la cantidad requerida) estas mezclas se realizaron para 1 L de solución

(Figura 8). Una vez extraída la cantidad necesaria de producto se vertió en una probeta de 1 L y se cubrió la cantidad sobrante con agua de garrafón hasta completar 1 L, posteriormente se tapó la parte de arriba con la mano, para comenzar a agitar el contenido hasta conseguir una mezcla homogénea (el tiempo de mezclado se estableció en 2 minutos) (Figura 9).

Al obtener la mezcla homogénea con ayuda de una probeta de 100 mL se le aplicó 60 mL a cada planta. El número de plantas para la aplicación de Boro y de Zinc fue de 16 plantas cada uno.

Para los productos de Boro y Zinc se realizó la metodología de mezclado antes descrita exceptuando al Manganeso, las cantidades se pesaron con ayuda de una balanza de precisión, comenzando con la cantidad mínima en la probeta de 1 L se agregaron 200 mililitros de agua y después se le agregó el producto denso y se comenzó a mezclar por 2 minutos, pasado ese tiempo se le agregaron 300 mL más de agua y se mezcló por otros 2 minutos, finalmente se agregaron los 280 mL restantes de agua a la probeta (completando 780 mL) y se agitaron por otros 2 minutos, al finalizar, se procedió a medir sobre la probeta de 100 mL los 60 mL correspondientes a cada planta. En este caso se preparó 780 mL a diferencia de las otras diluciones ya que el número de plantas constaba de 13 ejemplares.



Figura 8. Adición del micronutriente Zinc, Boro, Manganeso (de izquierda a derecha) a la pipeta para posteriormente llenar el resto con agua.



Figura 9. Mezclas homogéneas de Zinc y Boto (de izquierda a derecha).

#### **4.7 Variables evaluadas**

Las variables se evaluaron cada quince días a partir de la fertilización.

Altura de la planta: Bajo el sistema métrico decimal se tomó una medida única desde la base del tallo hasta la parte superior del tallo principal.

Grosor del tallo: La lectura se realizó con ayuda de un vernier a una altura desde el suelo de 5 cm.

Largo de hojas: Lectura única, la cual consistió en la medida del largo del tercer y cuarto par de la rama más larga del cafeto.

Ancho de hojas: Lectura única, la cual consistió en la medida de la hoja en su parte más ancha del tercer y cuarto par de la rama más larga del cafeto.

Numero de hojas: Numero de hojas totales del cafeto.

Fisiología del cafeto: Registro de coloración y deformaciones observada en hojas del cafeto.

#### 4.9 Análisis de datos.

Se realizaron análisis estadísticos para identificar la relación entre variables, evaluar el comportamiento y dispersión de los datos, análisis que permitieron una discusión más clara del efecto de los tratamientos y su comportamiento durante el experimento.

Posteriormente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para casos desbalanceados con una confiabilidad del 95 % ( $P \leq 0.05$ ) dada la ausencia de una repetición en los tratamientos 17 al 22. Estos análisis se realizaron con ayuda del software R versión 4.0 para el sistema operativo Windows.

### V.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 Diagnostico químico del sustrato

Posterior a la medición del pH del sustrato (Figura 10) y antes del trasplante se tomó una muestra del mismo y se envió al laboratorio Fypa® para conocer los porcentajes de nutrientes antes del inicio del experimento arrojando los siguientes resultados:

Cuadro 5. Resultados de elementos obtenidos del análisis de sustrato por el laboratorio Fypa®.

Análisis químico	Unidad	Resultado
Carbono Total	%	12.077
Nitrógeno Total	%	0.51
Calcio (CaO)	%	1.419
Magnesio (MgO)	%	0.431
Sodio (Na <sub>2</sub> O)	%	0.095
Potasio (K <sub>2</sub> O)	%	0.335
Fosforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	0.870

---

Hierro (Fe)	mg/kg	0.2752
Cobre (Cu)	mg/kg	0.0017
Zinc (Zn)	mg/kg	0.0088
Manganeso (Mn)	mg/kg	0.0213

---



Figura 110. a: Prueba de campo para medir el pH del sustrato; b: Sustrato utilizado para el experimento; c: Se puede observar una medida de 5.5 en escala de pH en el potenciómetro sobre la muestra.

## 5.2 Diagnóstico de niveles óptimos del material vegetativo.

El resultado del análisis químico foliar indico niveles en su mayoría altos y óptimos para la mayoría de los micronutrientes.

Cuadro 6. Resultados de los niveles químicos de las muestras foliares por el laboratorio Fypa®.

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría de evaluación</b>
Nitrógeno (N)	2.43	%	ÓPTIMO
Fosforo (P)	0.106	%	ÓPTIMO
Potasio (K)	1.960	%	BAJO
Calcio (Ca)	0.963	%	ÓPTIMO
Magnesio (Mg)	0.340	%	ÓPTIMO
Hierro (Fe)	248.8	mg/kg	ALTO
Cobre (Cu)	28.13	mg/kg	ALTO
Zinc (Zn)	22.75	mg/kg	ÓPTIMO
Manganeso (Mn)	197.18	mg/kg	ÓPTIMO
Boro (B)	21.16	mg/kg	BAJO

### **5.3 Estimación de crecimiento vegetativo**

En este experimento se determinó realizar una estimación del área foliar mediante un método no destructivo que no requiere desprender las hojas de las plantas, sino que permite estimar el Área Foliar (AF) con un alto grado de aproximación (Martín *et al.*, 2006).

El cálculo se realizó utilizando la expresión alométrica  $AFE = L * A - PE$  (Donde  $AFE$  es el área foliar estimada,  $L$  es el largo de la hoja,  $A$  es el ancho de la hoja y  $PE$  es el porcentaje de estimación) con la que se pudo estimar el área foliar de una hoja con las medidas del largo y ancho.

El proceso para la estimación del área foliar de los tratamientos comenzó tomando datos de largo y ancho de cada una de las hojas de 5 ramas muestra sin desprender ninguna de una manera homogénea. El tamaño de la muestra se determinó bajo un muestreo simple tomando como número de muestra de 5 ramas puesto que la población tomada para el número de ramas, fue el promedio (14 ramas) del número de ramas de las 106 plantas.

Estas 5 ramas se escogieron con base en una tabla de aleatorización que indicaba que número de rama sería la seleccionada dependiendo el número de ramas totales que tuviese para esto se enumeró a cada rama de cada planta y una vez identificado el número de rama correspondiente esta se marcaba para posteriormente realizar la medición antes descrita.

Utilizando una regla milimétrica para el largo se tomó la medida desde el ápice de la hoja hasta la terminación del limbo sin tomar en cuenta el peciolo, para el ancho se midió a la hoja sobre su parte más ancha.

Con los datos tomados se pudo obtener por extrapolación el número de ramas por planta por tratamiento, número de hojas promedio por rama por tratamiento, largo y ancho promedio de la hoja por rama por tratamiento. Y finalmente poder calcular el área foliar de la hoja por tratamiento.

#### **5.3.1 Modelo alométrico**

La comprobación de la funcionalidad, y precisión de la expresión utilizada para calcular el área foliar de las hojas tuvo una validación en una parcela con plantas de café con una edad

de 1 a 2 años de la variedad Marsellesa. En donde se tomaron muestras foliares bajo la metodología descrita por (Alvaréz, 2013).

En este lote se tomó un total de 30 hojas sanas y maduras de la parte media del cafeto, seleccionando los árboles en forma de zigzag. La recolección de las hojas por cafeto fue desprendiendo el tercer par de hojas (de afuera hacia adentro de la bandola); tomando como primer par aquellas que presentaban un a longitud mayor de 5 cm. Por cada cafeto se tomaron 4 hojas, 2 por cada bandola ubicadas en el sentido opuesto del árbol.

Una vez recolectadas las hojas estas se colocaron en bolsas de plástico identificadas con una etiqueta indicando la fecha de recolección. A cada hoja con ayuda de una regla milimétrica se tomó el largo desde el ápice hasta cubrir todo el limbo sin tomar en cuenta el peciolo y el ancho de la hoja y se le calculo el área foliar utilizando el método fotográfico con ayuda del software móvil Petiole® (Polunina *et al.*, 2018).

Para la medición fue necesario calibrar la aplicación con las plantillas número 10 (para hojas de un máximo de 15 cm.) y 15 (para hojas de un máximo de 20 cm.) descargadas desde la aplicación móvil.

Con esos datos se pudo calcular el porcentaje de estimación tras la realizaron de operaciones matemáticas para estimar el porcentaje de diferencia entre el área foliar real y el área que se obtiene con la multiplicación de las variables de interés; es decir se determinó el porcentaje de diferencia promedio que hay entre la multiplicación del largo y el ancho con el área foliar real.

Luego se estimó el coeficiente de recesión lineal para identificar el tipo de relación entre el Área Foliar Real (ARF) y el Área Foliar Estimada (AFE), para validar si la expresión para determinar el área foliar de la hoja en función del largo y ancho, sobrestima, subestima o hay una estimación uno a uno con los valores del AFR. La validación consistió en corroborar que el coeficiente de determinación fuera mayor a 0.9 Este estudio se le realizo un análisis de varianza con una confiabilidad del 95%.

### 5.3.2 Validación del modelo alométrico

La validación del modelo alométrico busco comprobar la efectividad de la expresión  $AFE = L * A - 27.41 \%$  que se utilizó para estimar el área foliar de una hoja en comparación a un método de medición fotográfico por el software Petiole®.

En este estudio se encontró que, en promedio al resultado de multiplicar el largo y el ancho de una hoja de café se le resta un 27.41 por ciento, y el resultado se aproxima significativamente al valor real del área foliar. Este porcentaje se obtuvo de los promedios de los porcentajes de diferencia entre el área foliar real y el área resultante de la multiplicación entre el largo y el ancho de las 30 hojas tomadas para esta validación.

La correlación entre el producto del largo y ancho de las hojas menos el porcentaje de estimación (27.41) y el área real foliar mostro una alta interacción entre estas variables ( $r^2=.95$ ). El factor de correlación indico que el AFR se explica en un 95 por ciento por la expresión que se utilizó para estimar el AFE ( $AFE = L * A - 27.41 \%$ ).

Con base en estudios previos (Cabezas G. *et al.*, 2009; Martín *et al.*, 2006; Montoya *et al.*, 2017; Rojas & Seminario, 2014) los resultados obtenidos indicaron la efectividad del modelo alométrico utilizado para estimar el área foliar en esta investigación utilizando variables como el largo y ancho de una hoja.

Cuadro 7. El Factor de Correlación entre las variables evidencia una alta relación entre el área foliar real y la expresión utilizada para estimar el área foliar. El valor muestra una alta interacción puesto que estadísticamente se considera el valor superior a .7

	PE	AREA
PE	1 <.0001	0.95998
AREA	0.95998 <.0001	1

#### 5.4 Análisis de varianza (ANOVA)

Posterior a realizar el ANOVA se comprobó la homogeneidad de varianzas en todas las respuestas con tratamientos como variable dependiente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Prueba de Bartlett de homogeneidad de varianzas. Se observa que la significancia observada (P-value) son mayores de 0.05, por lo que no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula (Ho) de que las varianzas son iguales. Comprobando que hay homogeneidad de varianzas entre las variables dependientes. ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, AFET: Área foliar estimada total, DF: Grados de libertad.

	Bartlett K-Squared	DF	P-Value
ASA	17.702	27	0.9124
GT	16.749	27	0.9371
LR	17.053	27	0.9298
NH	24.084	27	0.6256
AFET	21.235	27	0.7752

Bajo un diseño experimental completamente al azar se realizó un análisis de varianza para casos desbalanceado (Cuadro 10), en los resultados de dicho análisis de las variables estudiadas respecto a los 28 tratamiento se puede observar que no hubo diferencias significativas para ningún tratamiento dentro del experimento puesto que las variables mostraron valores mayores a 0.05, valores que nos permitieron aceptar la hipótesis nula de estableciendo que los tratamientos son estadísticamente iguales.

Este estudio fue comprendido por un periodo de estudio de 116 días en plantas de 8 meses de vida. La posible causa del efecto nulo de la inoculación de los consorcios micorrícicos puede atribuirse al tiempo de estudio y a la etapa fenológica en la que se encontraban las plantas utilizadas para el experimento dado que en diferentes estudios realizados en café (Alecrim *et al.*, 2016; Andrade *et al.*, 2009; Ballesteros Possú *et al.*, 2004; Fernández Martín *et al.*, 2005; Rivillas, 2003; Rodriguez, 2001; Sánchez *et al.*, 2006) la inoculación se efectuó

en etapas tempranas del cultivo como la germinación o en vivero, ya que efectuar la inoculación en estas etapas garantizara un buena absorción de agua y nutrientes que desarrollaran a la planta de manera sustancial en su desarrollo además, cabe mencionar que el tiempo de evaluación en algunos de estudios comprendió ciclos reproductivos completos mayores al tiempo de evaluación que se tuvo para esta investigación.

Algunos autores (Lopes *et al.*, 1998; Sieverding & Toro, 1985; Siqueira *et al.*, 1987) indican que realizar la inoculación de HMA es altamente efectiva para mejorar en gran medida el estado nutricional de las plantas después del trasplante como se realizó en esta investigación, señalando la posible efectividad de la inoculación en las plantas que se utilizaron para este experimento. Sin embargo, los resultados obtenidos no son claros puesto que al finalizar el experimento se necesitó realizar una comprobación de la colonización de HM, así como cuantificar el nivel de inoculación que se presentó como se realizó en distintos experimentos (Bakhshandeh *et al.*, 2017; Chenchouni *et al.*, 2020; Helander *et al.*, 2018) . Dicho porcentaje del nivel de inoculación de las micorrizas tiene una relación directa en la ausencia de elementos como el fosforo, que mejoran la proliferación de las micorrizas y desarrollan una efectividad más rápida, de igual manera las plantas inoculadas con algún tipo de micorrizas responden a la presencia y aumento de elementos como el nitrógeno en comparación a plantas no inoculadas (Pugh *et al.*, 1981). Factores como la condición nutrimental del medio (sustrato) en que se trasplantaron las plantas pudo influir significativamente en una inoculación adecuada (Levisohn, 1960), antes del establecimiento del experimento ser realizo un análisis químico (Cuadro 5) del sustrato usado en el experimento que contrasta con los requerimientos de un suelo con condiciones nutrimentales optimas (FAO, 2017), señalando la posible causa de un efecto nulo.

### 5.4.1 Análisis de variables

Posterior al análisis de los tratamientos, se corroboró que el comportamiento de las variables dependientes fuera normal con ayuda de histogramas para cada una (Ver Gráfico 1-5) y un gráfico cuantil-cuantil para la variable de Area Foliar (Ver Gráfico 6), así como un diagrama bloxplot para mostrar la dispersión de los datos correspondientes a todos los tratamientos de la variable AFT (Ver Gráfico 7).

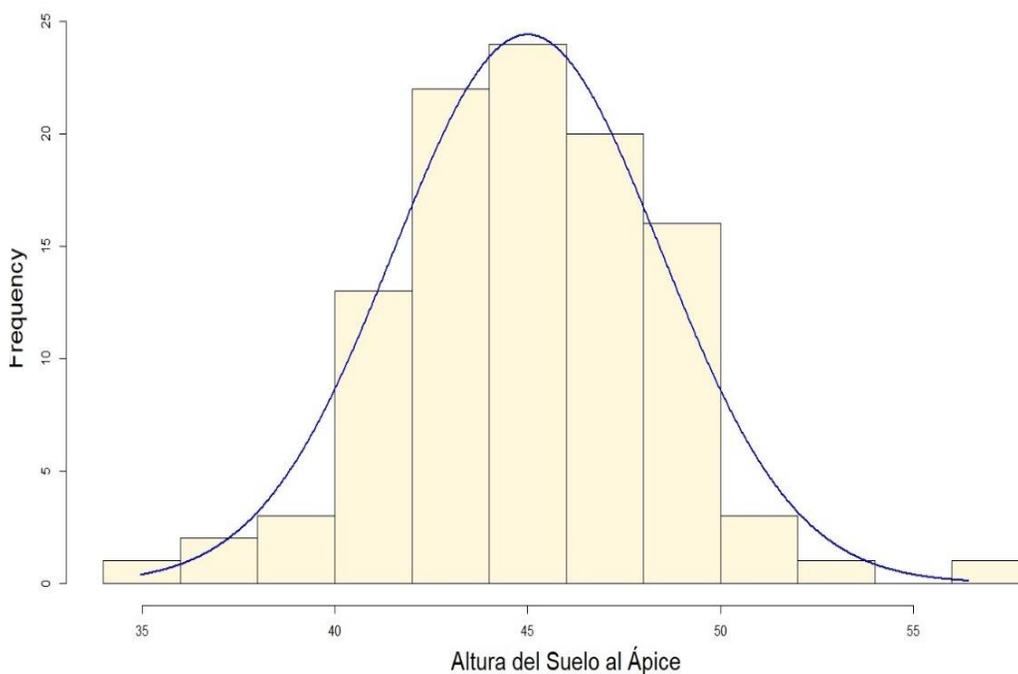


Gráfico 1. Histograma de la variable Altura del Suelo al Ápice (ASA). Se observa un pico de 45 cm de altura siendo la dispersión de 10 cm. para la mínima y la máxima, determinando un comportamiento simétrico.

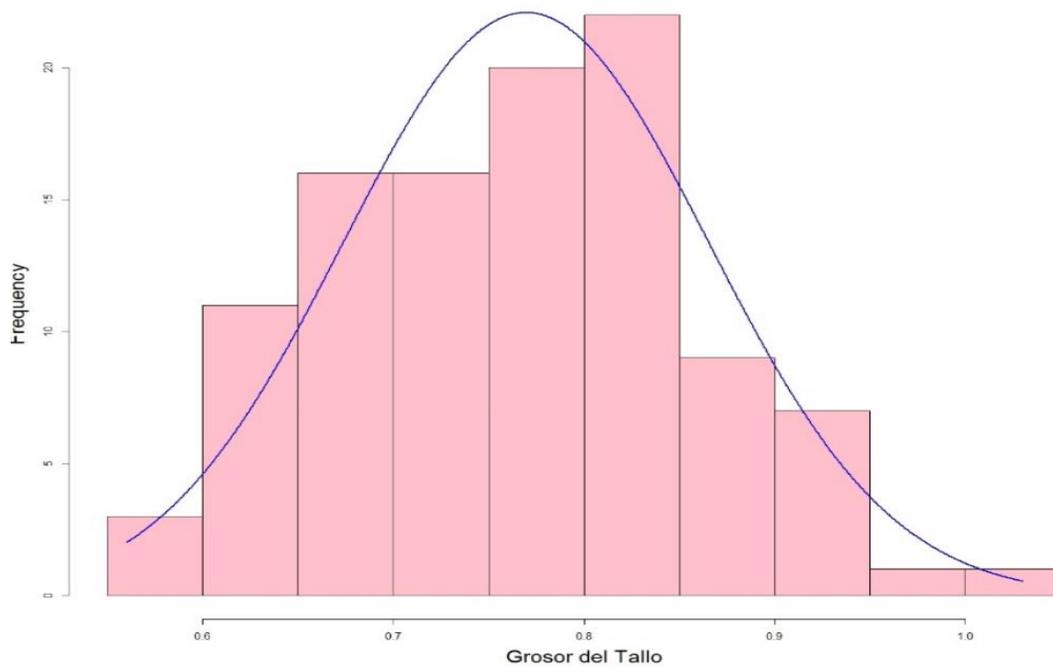


Gráfico 2. Histograma de la variable Grosor del Tallo (GT). En este grafico podemos observar una ligera asimetria hacia la izquierda, la cual indica que la media de GT es menor a la media

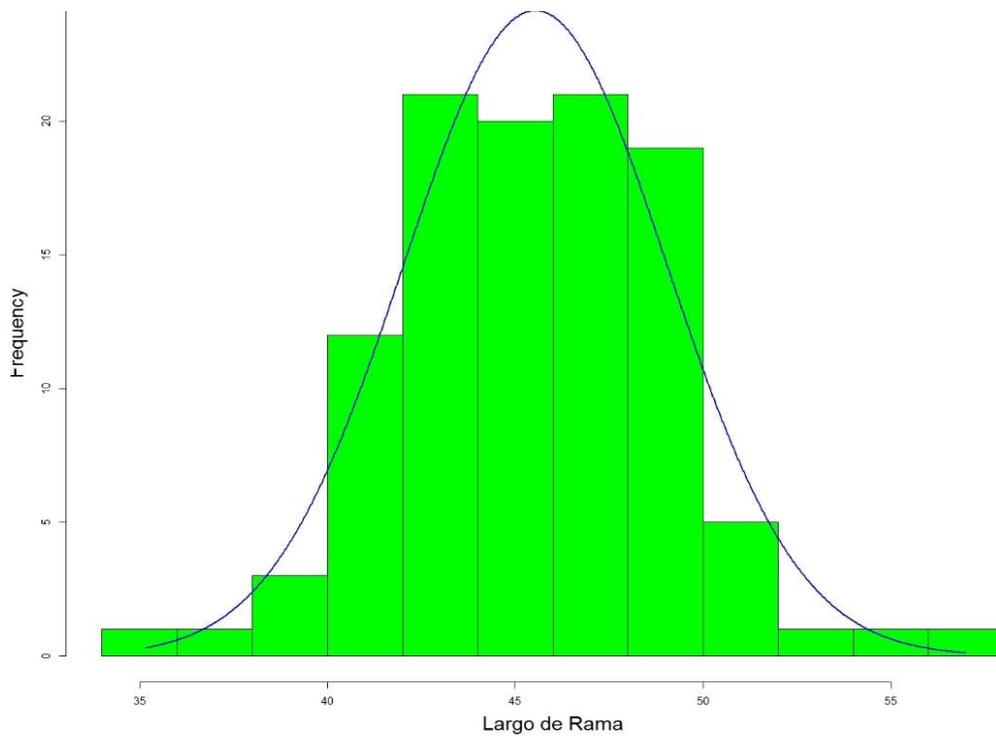


Gráfico 3. Histograma de la variable Largo de la Rama (LR). La línea de distribución muestra una curvatura con un comportamiento simétrico.

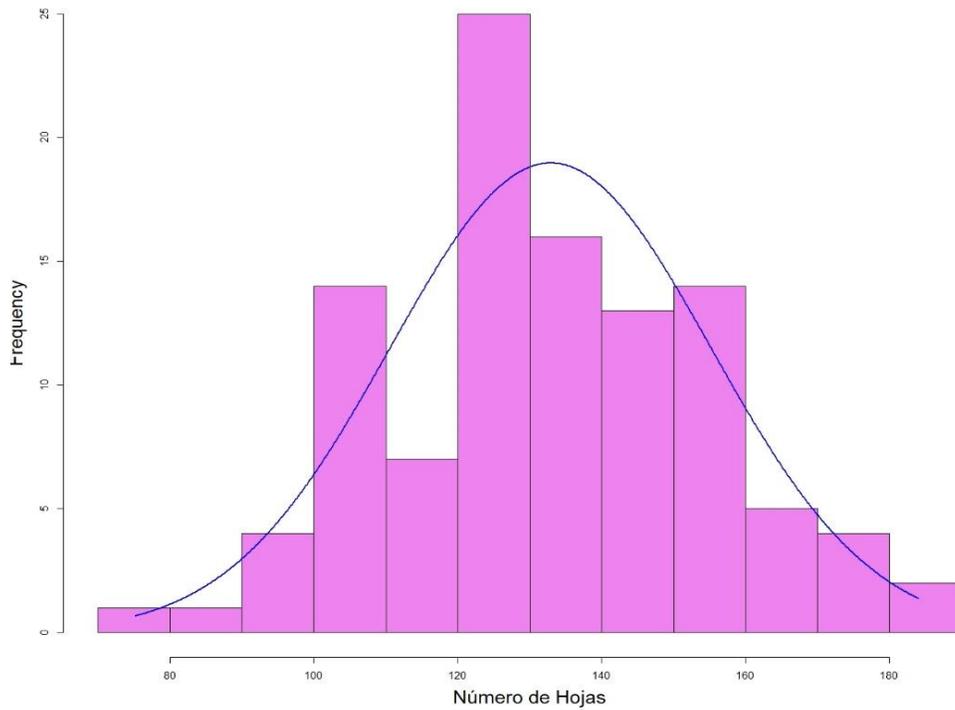


Gráfico 4. Histograma de la variable Numero de Hojas (NH). Los datos muestran un comportamiento simétrico, omitiendo el valor atípico que resalta. Esta simetría se puede observar de mejor manera en la línea de distribución.

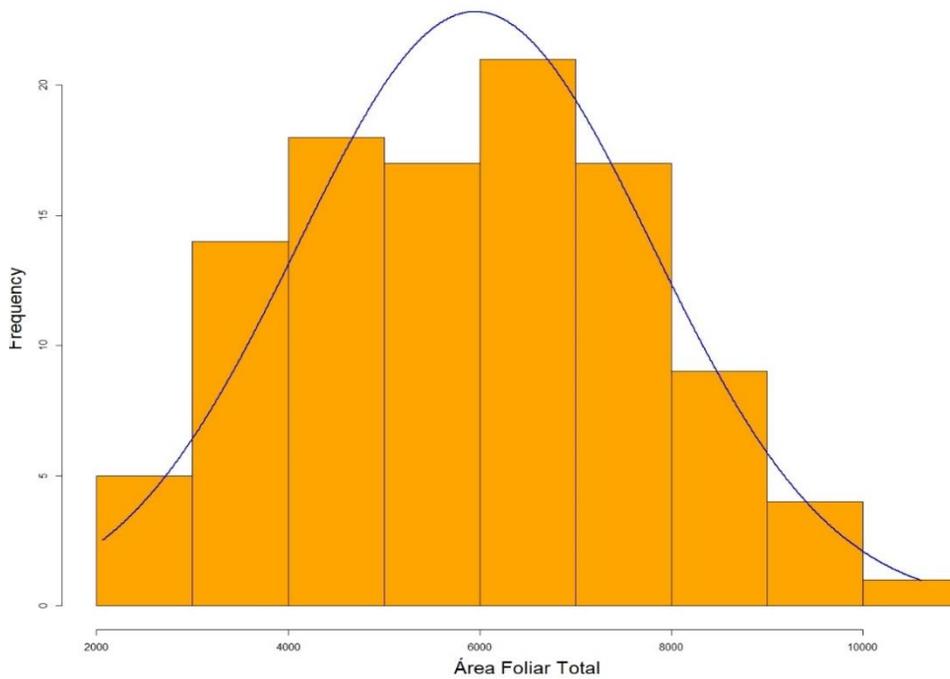


Gráfico 5. Histograma de la variable Área Foliar Total (AFT). La línea de distribución muestra una ligera asimetría a la izquierda en los datos de AFT.

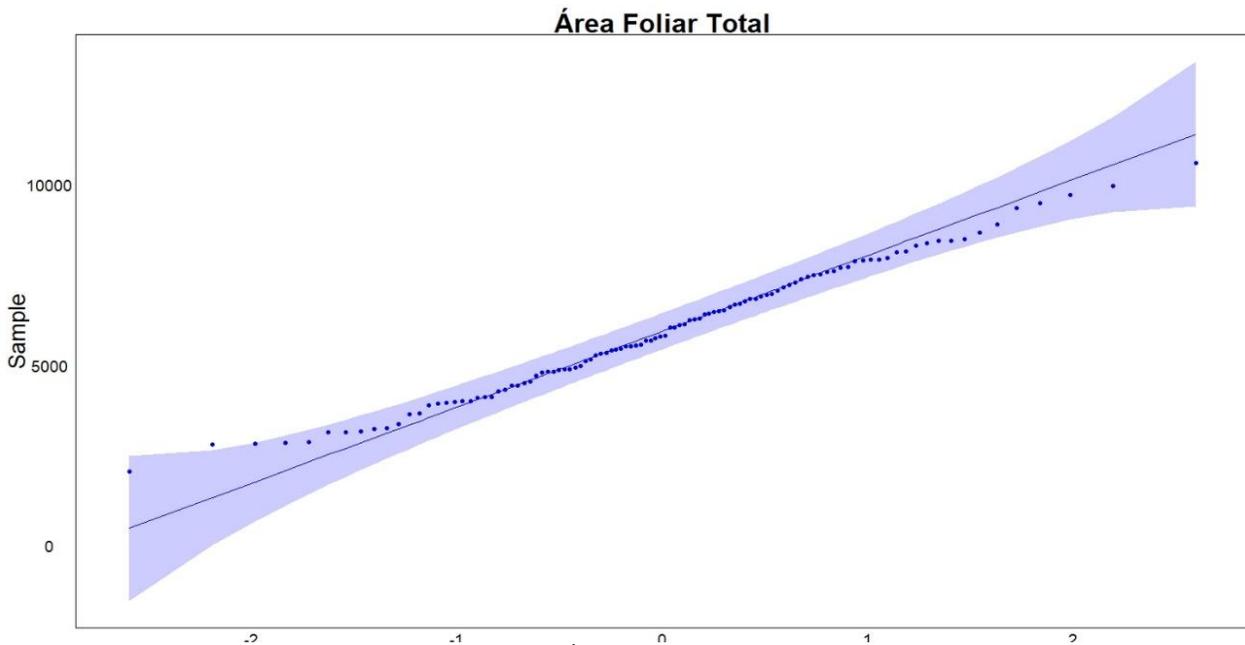


Gráfico 6. Gráfico Q-Q (cuantil-cuantil) del Área Foliar Total (AFT). Muestra el comportamiento de los datos de AFT respecto a la diagonal que ilustra un comportamiento ideal de AFT, se observa un comportamiento no tan disperso, que señala un buen comportamiento.

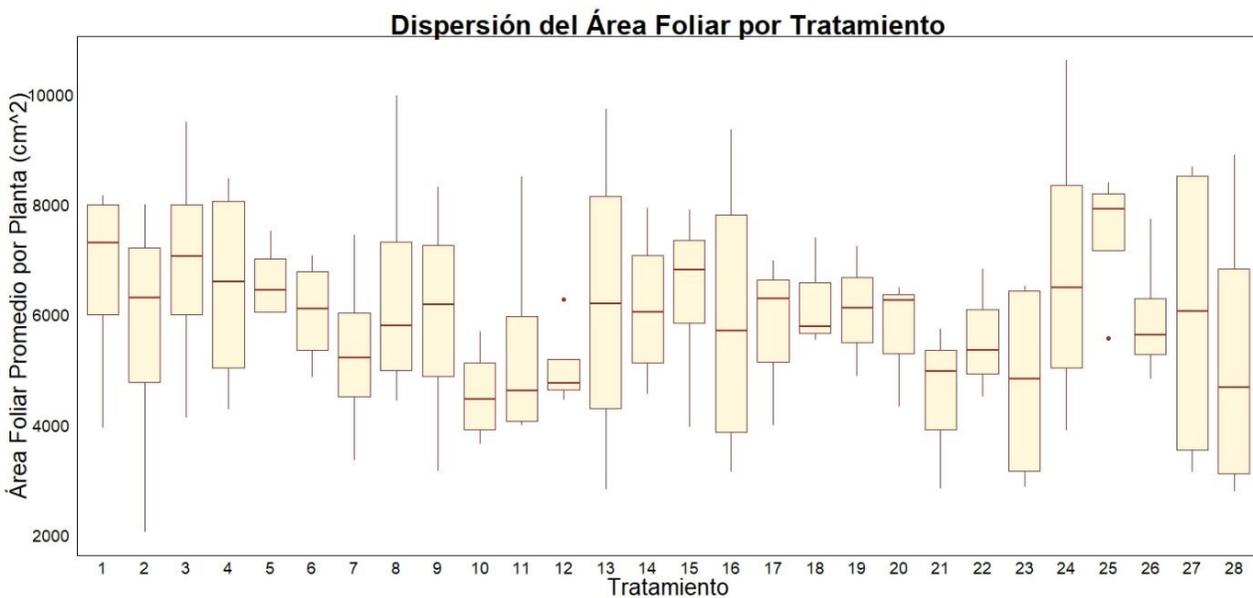


Gráfico 7. Diagrama bloxplot de dispersión de los datos del Área Foliar por Tratamiento. Se puede observar una dispersión más amplia en los datos de los tratamientos 13, 4, 16, 23, 24, 27 y 28 mientras que se aprecia una dispersión menor para los tratamientos 12, 5 y 18

#### 5.4.2 Análisis de relación entre variables

Se realizó un análisis para verificar la relación entre las variables de respuesta, en el Cuadro 7 se puede observar la matriz de correlaciones, en el Cuadro 8 los niveles de significancia presentados. Si la significancia observada es menor a 0.05 hay evidencia para rechazar la  $H_0$ , de que las variables no están correlacionadas.

Cuadro 7. Análisis de varianza con una confiabilidad al 95 % Pr (<0 .05). ASA: Altura del Suelo al Ápice, GT: Grosor del Tallo, LR: Largo de Rama, NH: Numero de Hojas, AFT: Altura Foliar Total, GL: Grados de libertad.

Variable	GL	Suma de cuadrados	de Cuadrado de la Media	Valor de F	(Pr< F)
ASA	27	352.92	13.071	1.1237	<b>.3365</b>
GT	27	0.18346	0.0067948	.6807	<b>.8689</b>
LR	27	366.38	13.569	1.1466	<b>.3132</b>
NH	27	8902	329.72	.5942	<b>.9353</b>
AFT	27	52266879	1935810	.4904	<b>.9801</b>

Cuadro 11. Matriz de correlaciones de Pearson. ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, LHP: Largo de la hoja primaria, AHP: Ancho de la hoja primaria, AFE: Area foliar estimada, AFET: Area foliar estimada.

	ASA	GT	LR	NH	LHP	AHP	AFE	AFET
ASA	1	0.3802	0.9993	0.1113	0.0178	-0.0874	-0.0358	0.0293
GT	0.3802	1	0.3753	0.1063	-0.0153	0.0108	0.0098	0.0648
LR	<b>0.9993</b>	0.3753	1	0.1062	0.0214	-0.0867	-0.0335	0.0285
NH	0.1113	0.1063	0.1062	1	-0.1019	-0.0151	-0.0686	0.4886
LHP	0.0178	-0.0153	0.0214	-	1	0.7280	0.9118	0.7399
AHP	-	0.0108	-0.0867	-	<b>0.7280</b>	1	0.9407	0.8033
	0.0874			0.0151				

AFE	- 0.0358	0.0098	-0.0335	- 0.0686	<b>0.9118</b>	<b>0.9407</b>	1	0.8290
AFET	0.0293	0.06485	0.0285	<b>0.4886</b>	<b>0.7399</b>	<b>0.8033</b>	<b>0.8290</b>	1

El coeficiente de correlación de Pearson nos indica que si este es igual a 1 o -1 podemos considerar que la relación entre las variables estudiadas es perfecta (Schober & Schwarte, 2018). Considerando lo anterior, los datos resaltados en el cuadro muestran una correlación alta entre esas variables, sin embargo, se realizó un análisis para conocer la significancia estadística de estos valores. (Cuadro 8)

Cuadro 12. Matriz de significancia estadística. NA: No aplica, ASA: Altura del suelo al ápice, GT: Grosor del tallo, LR: Largo de la Rama, NH: Numero de hojas, LHP: Largo de la hoja primaria, AHP: Ancho de la hoja primaria, AFE: Área foliar estimada, AFET: Área foliar estimada total.

	ASA	GT	LR	NH	LHP	AHP	AFE	AFET
ASA	NA	<b>5.80E-05</b>	0	0.2557	0.8559	0.3729	0.7153	0.7654
GT	<b>5.80E-05</b>	NA	<b>7.37E-05</b>	0.2779	0.8761	0.9121	0.9203	0.5089
LR	0	<b>7.37E-05</b>	NA	0.2785	0.8270	0.3765	0.7325	0.7715
NH	0.2557	0.2779	0.2785	NA	0.2983	0.8777	0.4842	<b>1.07E-07</b>
LHP	0.8559	0.8761	0.8270	0.2983	NA	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
AHP	0.3729	0.9121	0.3765	0.8777	<b>0</b>	NA	<b>0</b>	<b>0</b>
AFE	0.7153	0.9203	0.7325	0.4842	<b>0</b>	<b>0</b>	NA	<b>0</b>
AFET	0.7654	0.5089	0.7715	<b>1.07E-07</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	NA

La correlación se observó principalmente en las variables relacionadas con el crecimiento vegetativo como el área foliar estimada por planta (AFET) con el número de hojas (NH), la

altura de la planta (ASA) y el grosor del tallo (GT) y este último con el largo de la rama primaria (LR). El comportamiento entre las variables muestra una interacción normal se puede considerar normal ya que las variables influyen directamente sobre la otra puesto que la tasa de crecimiento de biomasa de una planta influye de manera directa en el área foliar de una planta (Sun *et al.*, 2019) .

## **5.5 Fisiología del cafeto**

### **5.5.1. Coloración en hojas.**

Durante el experimento las plantas estudiadas presentaron cambios en la fisiología del cafeto principalmente el tamaño de las hojas, deformaciones en forma de corazón y coloraciones “cloróticas”.

Estos cambios fueron en aumento, el primer registro de la coloración de las hojas se tuvo durante la toma de datos número cuatro (24/08/19), presentándose en un 49 % de las plantas en 24 tratamientos presentando coloraciones en la totalidad de la hoja en un aproximado de 4 a 8 hojas, un 10 % del número total de hojas en su mayoría jóvenes exhibiéndose en el primer par de las ramas (Figura 11).

Para la octava toma de datos (19/10/19) esta coloración en las hojas se presentó en 82 plantas en los 28 tratamientos del experimento; es decir aumento a un 77.3 %. Sin embargo, las plantas que ya habían presentado estas coloraciones no presentaron aumento para las demás hojas, al contrario, estas presentaron una disminución en la que solo se encontraban en el primer par de hojas con esta coloración. (Figura 12)

Para la última toma de datos (16/11/19) la coloración solo se presentó en un 37% de las hojas ya que se observó que la coloración se tornó de un color más fuerte como se puede observar en la Figura 13.

De acuerdo con la literatura (Becker, 2015; Carvajal, 1984; Sadeghian Khalajabadi, 2017) estos síntomas se pueden identificar visualmente y asociar con deficiencias de hierro en el sustrato, puesto que los niveles encontrados tras el análisis (Cuadro 6) indican bajos niveles de Fe en comparación con los niveles óptimos reportados por (Dubberstein *et al.*, 2019).

Cuadro 13. Observaciones correspondientes a las últimas 3 tomas de datos respecto a las coloraciones en las hojas. NC: No Contiene, C1:Consortio 1, C2:Consortio 2, C3:Consortio 3, X: Coloración presente.

No. Tratamiento	Composición del tratamiento		Coloración		
	Consortio	Microelemento	24/08/2019	19/10/2019	16/11/2019
1	NC	NC	X	X	-
2	C1	NC	X	X	-
3	C2	NC	X	X	X
4	C3	NC	X	X	-
5	C1	Zn+	X	X	X
6	C1	Zn-	X	X	-
7	C2	Zn+	X	X	-
8	C2	Zn-	X	X	-
9	C3	Zn+	X	X	-
10	C3	Zn-	-	X	X
11	C1	B+	-	-	-
12	C1	B-	X	X	-
13	C2	B+	X	X	X
14	C2	B-	X	X	-
15	C3	B+	X	X	-
16	C3	B-	X	X	X
17	C1	Mn+	-	X	-
18	C1	Mn-	X	X	X
19	C2	Mn+	X	X	X
20	C2	Mn-	-	-	-
21	C3	Mn+	X	X	X
22	C3	Mn-	X	X	-
23	SIN	Zn+	X	X	X
24	SIN	Zn-	X	X	X
25	SIN	B+	X	X	X
26	SIN	B-	X	X	-
27	SIN	Mn+	X	X	-
28	SIN	Mn-	X	X	X

Cuadro 14. Observaciones correspondientes a las 3 últimas tomas de datos respecto a las deformaciones en forma de corazón presentes en las hojas del café.

No. Tratamiento	Composición del tratamiento		Deformación		
	Consortio	Microelemento	24/08/2019	19/10/2019	16/11/2019
10	C3	Zn-	x	x	x
16	C3	B-	-	-	x
17	C1	Mn+	-	x	x
21	C3	Mn+	x	x	x



Figura 11. Cambio de la coloración en las hojas, excepto las del primer par.



Figura 12. Hojas con deficiencias la parte superior del arbusto.



Figura 12. Color de hojas que presentaron clorosis en tomas de datos anteriores

## **VI.-CONCLUSIÓN**

Como resultado de la investigación estadística presentada es posible concluir que el efecto de consorcios micorrícicos y bacterianos no mostraron resultados contundentes en las variables evaluadas de igual manera que la adición de micronutrientes en cantidades mínimas y máximas no mostrando deficiencias o toxicidad permanentes en los elementos estudiados.

El efecto nulo se puede atribuir al sustrato utilizado ya que no fue el adecuado, pues la cantidad de elementos minerales que se observaron en el análisis no eran los óptimos para el cultivo del café al igual que la cantidad de agua que se usó para los riegos.

### **Recomendaciones**

Continuar la investigación en periodos más prolongados que pudiesen observar el comportamiento de la fisiología de las plantas de aproximadamente un ciclo productivo.

De igual manera se abre la oportunidad a diferentes líneas de investigación que pudieran realizar un análisis de colonización micorrícica en los tratamientos inoculados, así como análisis foliares que permitan obtener datos del índice de absorción que se obtuvo en los micronutrientes estudiados en algún periodo determinado y estudiar el efecto en la composición fisicoquímica y sensorial en el grano tras el primer periodo de cosecha bajo la influencia de los diferentes tratamientos.

## VII.-LITERATURA CITADA

- A. Vera, A. L. (2001). El boro como nutriente esencial. *Ediciones de Horticultura*, 155, 11.  
[https://www.infoagro.com/hortalizas/boro\\_nutriente\\_esencial2.htm](https://www.infoagro.com/hortalizas/boro_nutriente_esencial2.htm)
- Aguilera Gomez, L. I., Olalde Portugal, V., Arriaga, M. R., & Contreras Alonso, R. (2007). Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*, 14, 300–306. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414307>
- Alberto, J., Zapata, R., Marrufo, D., Patricia, Z., Chávez, G., & Carrillo, L. (1991). *Hongos micorrízico-arbusculares*.
- Alecrim, A. O., Franca, A. C., Santos, E. A., Moreira, S. D., Leal, F. D. S., & Tibaes, E. S. R. (2016). Interference by Palisade Grass on Coffee Seedlings Inoculated with Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Planta Daninha*, 34(4), 681–690. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582016340400008>
- Alvaréz, C. N. de T. A. y F. "Enrique. (2013). Muestras de suelo y foliar en cultivo de café. *Centa- Café, guía*.
- Amezcuca, J., & LLra, M. (2017). El Zinc en las Plantas. *Ciencia*, 28–35. <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/zinc-in-plants>
- Andrade, S. A. L., Mazzafera, P., Schiavinato, M. A., & Silveira, A. P. D. (2009). Arbuscular mycorrhizal association in coffee. *Journal of Agricultural Science*, 147(2), 105–115.  
<https://doi.org/10.1017/S0021859608008344>
- Andrade-torres, A. (2010). Micorrizas. *Ciencia*, 84–90.
- Bakhshandeh, S., Corneo, P. E., Mariotte, P., Kertesz, M. A., & Dijkstra, F. A. (2017). Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.027>
- Ballesteros Possú, W., Unigarro S, A., Cadena Ortega, C. E., & Cadena Ortega, J. A. (2004). Evaluación de hongos formadores de micorrizas vesiculo arbusculares (MVA) en la etapa de almacigo de Cacao (*Theobroma cacao* L.), en Tumaco, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 21(1–2), 19.
- Becker, F. G. (2015). *Cartilla Cafetera 17. Disturbios Fisiologicos*.
- Beeckman, T. (2013). *Annual Plant Reviews, Volume 37, Root Development*. 37, 8–11.  
<https://www.wiley.com/en-us/Annual+Plant+Reviews%2C+Volume+37%2C+Root+Development-p-9781405161503>

- Bethlenfalvai, G. J., Linderman, R. G., & Bethlenfalvai, G. J. (2013). *Mycorrhizae and Crop Productivity*. 54, 1–27. <https://doi.org/10.2134/aspectpub54.c1>
- Buechley, E. R., Şekercioğlu, Ç. H., Atickem, A., Gebremichael, G., Ndungu, J. K., Mahamued, B. A., Beyene, T., Mekonnen, T., & Lens, L. (2015). Importance of Ethiopian shade coffee farms for forest bird conservation. *Biological Conservation*, 188, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.011>
- Cabezas G., M., Peña, F., Duarte, H. W., Colorado, J. F., & Lora Silva, R. (2009). Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(1), 121–130. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n1.2009.648>
- Camargo Ricalde, L., Montaña, S., de la Rosa Mera, N. M., Adriana Janette, C., & Arias Montaña, S. (2012). MICORRIZAS: UNA GRAN UNIÓN DEBAJO DEL SUELO. *Revista Digital Universitaria*, 13, 19. <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/>
- Cannell, M. G. R. (1985). Physiology of the Coffee Crop. In *Coffee* (pp. 108–134). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_5)
- Carvajal, J. F. (1984). *Cafeto: cultivo y fertilización* (I. I. de la Potasa, Ed.; 2 nd.).
- CEFP. (2001). El mercado del café en México. In *El Mercado Del Cafe En Mexico*. <http://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0542001.pdf>
- Challinor, A. J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., & Fraser, E. (2009). Crops and climate change: Progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2775–2789. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp062>
- Chenchouni, H., Mekahlia, M. N., & Beddiar, A. (2020). Effect of inoculation with native and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on growth and mycorrhizal colonization of olive (*Olea europaea* L.). *Scientia Horticulturae*, 261, 108969. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108969>
- Clemente, J. M., Martinez, H. E. P., Pedrosa, A. W., Poltronieri Neves, Y., Cecon, P. R., & Jifon, J. L. (2018). Boron, Copper, and Zinc Affect the Productivity, Cup Quality, and Chemical Compounds in Coffee Beans. *Journal of Food Quality*, 2018, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2018/7960231>
- Coninx, L., Martinova, V., & Rineau, F. (2017). Mycorrhiza-Assisted Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*, 83, 127–188. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.005>
- Couto Júnior, A. F., de Carvalho Júnior, O. A., Martins, É. de S., & Guerra, A. F. (2013). Phenological characterization of coffee crop (*Coffea arabica* L.) from MODIS time series. *Revista Brasileira de Geofísica*, 31(4), 569–578. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v31i4.338>

- Covre, A. M., Partelli, F. L., Bonomo, R., & Gontijo, I. (2018). Micronutrients in the fruits and leaves of irrigated and non-irrigated coffee plants. *Journal of Plant Nutrition*.  
<https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431665>
- Crespo, E. C., Villa, M. S., Haller, V. V., Chaparro, V. O., Luis, J., Torres, T., Escudero, J. S., Mezclas, G. D. E., Mediante, D. E. S., Programa, U. N., mexicana, S., & Ciencia, D. (2010). Substrates Derived from Simple Materials by Means of an Optimization Program by Using Physical. *Terra Latinoamerica*, 28, 219–229. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316064004>
- Dobo, B., Asefa, F., & Asfaw, Z. (2018). Effect of tree-enstet-coffee based agro-forestry practices on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species diversity and spore density. *Agroforestry Systems*, 92(2), 525–540. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0042-9>
- Dubberstein, D., Partelli, F. L., Espindula, M. C., & Dias, J. R. M. (2019). Concentration and accumulation of micronutrients in robust coffee. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 41(1).  
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42685>
- Efe, R., Curebal, I., Gad, A., & Tóth, B. (2016). *Environmental and Sustainable and Landscape and Landscape Management* (1er Edición). St. Kliment Ohridski University Press.  
[https://www.researchgate.net/profile/Hande\\_Cinar4/publication/322489477\\_Sustainable\\_management\\_and\\_protection\\_of\\_historical\\_landscape\\_the\\_Case\\_of\\_Bakirkoy\\_Mental\\_and\\_Psychiatric\\_Diseases\\_Hospital\\_Garden-Istanbul-Turkey/links/5b9b849392851ca9ed06cfb4/Sustainable-management-and-protection-of-historical-landscape-the-Case-of-Bakirkoe-y-Mental-and-Psychiatric-Diseases-Hospital-Garden-Istanbul-Turkey.pdf#page=231](https://www.researchgate.net/profile/Hande_Cinar4/publication/322489477_Sustainable_management_and_protection_of_historical_landscape_the_Case_of_Bakirkoy_Mental_and_Psychiatric_Diseases_Hospital_Garden-Istanbul-Turkey/links/5b9b849392851ca9ed06cfb4/Sustainable-management-and-protection-of-historical-landscape-the-Case-of-Bakirkoe-y-Mental-and-Psychiatric-Diseases-Hospital-Garden-Istanbul-Turkey.pdf#page=231)
- Elliott, E. T., Elliott, D. C. C., & Coleman, E. T. (1988). Let the soil work for us. *Ecological Bulletins*.
- FAO. (2017). *Arabica coffee manual for Myanmar*. Corporate Document Repository.  
<http://www.fao.org/3/ae939e/ae939e06.htm>
- FAO. (2019). Agriculture and climate change – Challenges and opportunities at the global and local Level. In *Science* (Vol. 257, Issue 5066). <https://doi.org/10.1126/science.257.5066.9>
- Fernandes, R. A., Ferreira, D. A., Saggin-Junior, O. J., Stürmer, S. L., Paulino, H. B., Siqueira, J. O., & Carneiro, M. A. C. (2016). Occurrence and species richness of mycorrhizal fungi in soil under different land use. *Canadian Journal of Soil Science*, 96(3), 271–280. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0011>
- Fernández Herrera, E., Acosta Ramos, M., Ponce González, F., & Manuel Pinto, V. (2007). Manejo Biológico de *Phytophthora capsici* Leo., *Fusarium oxysporum*.: Fr y *Rhizoctonia solani* Kühn en Jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35, 35–42.

- Fernández Martín, F., Rivera Espinosa, R. A., Hernández Jiménez, A., Herrera Peraza, R. A., & Fernández Suárez, K. (2005). INOCULACIÓN DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y DIFERENTES RELACIONES SUELO: HUMUS DE LOMBRIZ SOBRE EL CRECIMIENTO DEL CAFETO (*Coffea Arabica* L.) cv. Catuaí BAJO LA ETAPA DE VIVERO. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XI (1), 175–184. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2003.04.031>
- Ferrera Cerrato, R., & Alarcón, A. (2007). *Microbiología agrícola: hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico y planta-microorganismo*.
- Figuroa Hernández, E., Pérez Soto, F., & Godínez, L. (2015). La producción y el consumo del café. In M. García Miranda (Ed.), *Ecorfan*. [www.ecorfan.org/spain](http://www.ecorfan.org/spain)
- Gay, C., Estrada, F., & Conde, C. (2004). Impactos Potenciales del Cambio Climático en la Agricultura: Escenarios de Producción de Café para el 2050 en Veracruz (México). *El Clima Entre El Mar y La Montaña*, 4(June), 651–660. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9071>
- Helander, M., Saloniemi, I., Omacini, M., Druille, M., Salminen, J. P., & Saikkonen, K. (2018). Decreases mycorrhizal colonization and affects plant-soil feedback. *Science of the Total Environment*, 642, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.377>
- Hernández, F. B. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos: [multimedia]* (Primera Ed). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Ho, T. Q., Hoang, V. N., Wilson, C., & Nguyen, T. T. (2017). Which farming systems are efficient for Vietnamese coffee farmers? *Economic Analysis and Policy*, 56, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2017.09.002>
- Honrubia, M. (2009). Las micorizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*, 66(SUPPL. 1), 133–144. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2226>
- ICO. (2012). © *International Coffee Organization*. Coffee Production. [http://www.ico.org/es/new\\_historical\\_c.asp?section=Estad%EDstica](http://www.ico.org/es/new_historical_c.asp?section=Estad%EDstica)
- Indian Estates. (2010). *Nutrient Management of Degraded Soils* (pp. 125–174). <https://doi.org/10.1201/b10160-6>
- Jaramillo, I. R. (2011). La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizosfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. *ContactoS*, 81, 17–23.
- Jezeer, R. E., & Verweij, P. A. (2015). *Shade grown coffee - double dividend for biodiversity and small-scale coffee farmers in Peru*. <http://nationalzoo.si.edu/scbi/migratorybirds/coffee/>

- Keymer, A., Pimprikar, P., Wewer, V., Huber, C., Brands, M., Bucerius, S. L., Delaux, P. M., Klingl, V., von Röpenack-Lahaye, E., Wang, T. L., Eisenreich, W., Dörmann, P., Parniske, M., & Gutjahr, C. (2017). Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *ELife*, 6. <https://doi.org/10.7554/eLife.29107>
- Levisohn, I. (1960). PHYSIOLOGICAL AND ECOLOGICAL FACTORS INFLUENCING THE EFFECTS OF MYCORRHIZAL INOCULATION. *New Phytologist*, 59(1), 42–47. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1960.tb06199.x>
- Lopes, E. S., Oliveira, E. de, Dias, R., Schenck, N. C., Lugo Urribarrí, L., Rivas Platero, G. G., Rojas Miranda, T., Vázquez, N., Lugo Urribarrí, L. E., & Rivas Platero, G. G. (1998). *Occurrence and distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in coffee (Coffea arabica L.) plantations in Central Sao Paulo State, Brazil. Ocurrencia y distribución de hongos en micorriza vesicular-arbuscular en plantaciones de café (Coffea arabi*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302051061>
- Loreto, D., Esperón Rodríguez, M., & Barradas, V. L. (2017). The climatic-environmental significance, status and socioeconomic perspective of the grown-shade coffee agroecosystems in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Investigaciones Geograficas*, 2017(92), 87–100. <https://doi.org/10.14350/ig.51876>
- Martín, G. M., Soto, F., & Rentería, R. R. M. (2006). Estimación de la superficie foliar de la Canalvalia ensifomis a partir de las medidas lineales de sus hojas. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, 27(4), 77–80.
- Medina Meléndez, J. A., Ruiz Nájera, R. E., Gómez Castañeda, J. C., Sánchez Yáñez, J. M., Gómez Alfaro, G., & Pinto Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (Coffea arabica L.) en la región Frailesca, Chiapas TT. *CienciaUAT*, 10(2), 33–43. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-78582016000100033&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v10n2/2007-7858-cuat-10-02-00033.pdf](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582016000100033&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v10n2/2007-7858-cuat-10-02-00033.pdf)
- Montalvo, J., & Monica, V. (2017). *International Coffee Organization - Historia del café*. 23 mayo. [http://www.ico.org/ES/coffee\\_storyc.asp](http://www.ico.org/ES/coffee_storyc.asp)
- Montoya, E., Hernández, J., Unigarr, C., & Flores, C. (2017). *Estimación del área foliar en café variedad castillo a libre exposición y su relación con la producción*. 68(1), 55–61.
- Nuhu, A. A. (2014). Bioactive Micronutrients in Coffee: Recent Analytical Approaches for Characterization and Quantification. *ISRN Nutrition*, 2014(January), 1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/384230>

- Polunina, O. v., Maiboroda, V. P., & Seleznov, A. Y. (2018). Evaluation Methods of Estimation of Young Apple Trees Leaf Area. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 2, 80–82. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2018-21-80-82>
- Prasad, R., Bholra, D., Akdi, K., Cruz, C., KVSS, S., Tuteja, N., & Varma, A. (2017). Introduction to mycorrhiza: Historical development. In *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art: Fourth Edition* (pp. 1–7). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_1)
- Pugh, L. M., Roncadori, R. W., & Hussey, R. S. (1981). Factors Affecting Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Development and Growth of Cotton. *Mycologia*, 73(5), 869. <https://doi.org/10.2307/3759798>
- Ramfrez, J. E. (1998). RESPUESTA DEL CAFETO A LA APLICACION DE DOSIS DE BORO AL SUELO EN DOS Y TRES EPOCAS, EN ANDISOLES DE HEREDIA, ¡COSTA RICA! *Agronomia costarricense*, 22(1), 19–26.
- Razafinarivo, N. J., Guyot, R., Davis, A. P., Couturon, E., Hamon, S., Cruzillat, D., Rigoireau, M., Dubreuil-Tranchant, C., Poncet, V., de Kochko, A., Rakotomalala, J. J., & Hamon, P. (2013). Genetic structure and diversity of coffee (*Coffea*) across Africa and the Indian Ocean islands revealed using microsatellites. *Annals of Botany*, 111(2), 229–248. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs283>
- Rivera-Conde, M. I., Aranda-Ocampo, S., Carrillo-Castañeda, G., Gijón-Hernández, A. R., & Bueno-Aguilar, G. M. (2018). Effect of fluorescent *Pseudomonas* on seed germination and vigor of tomato seedlings. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 24(2), 121–132. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.06.023>
- Rivillas, C. A. (2003). Las micorrizas arbusculares en el cultivo del café. *Cenicafé*, 1993, 64–74. [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/993/10/8.Micorrizas arbusculares en el cultivo.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/993/10/8.Micorrizas%20arbusculares%20en%20el%20cultivo.pdf)
- Rodriguez, J. (2001). Efecto del biofertilizante Mycoral (micorriza arbuscular) en el desarrollo del café (*Coffea arabica* L.) en vivero en Zamorano, Honduras. In *Ciencia y Producción Agropecuaria*. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1415/1/T1271.pdf>
- Rojas, J., & Seminario, J. (2014). Método alométrico para estimar el área foliar de “valeriana” (*Valeriana pilosa* Ruiz & Pav.) al estado silvestre. *Arnaldoa*, 21(2), 305–316.
- Rosolem, C. A., & Sacramento, L. V. S. (2001). Efficiency of foliar Zn fertilizers in coffee and citrus. In *Plant Nutrition* (pp. 704–705). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-47624-x\\_341](https://doi.org/10.1007/0-306-47624-x_341)
- Sadeghian Khalajabadi, S. (2017). Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en café. In *Cenicafé* (p. 12). [www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)

- Sánchez, C., Caballero, D., Rivera, R., & Cupull, R. (2006). Respuesta de cepas de hongos micorrizógenos (HMA) sobre el desarrollo de posturas de cafeto. I Parte. Suelo pardo gleyzoso. *Centro Agrícola*, 33(1), 33–38.
- Sandoval, K. S. M., & Ordoñez, D. A. K. M. (2013). Presencia de hongos micorrizógenos arbusculares en tres áreas de intervención antropica en la Vereda Albania del municipio de Tibacuy -Cundinamarca. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Schüßler, A., & Walker, C. (2010). The Glomeromycota: species list with new families and new genera. *Read*. <http://www.mycobank.org/BioloMICS.aspx?TableKey=14682616000000061&Rec=52199&Fields=All>
- Sela, G. (2019). *El manganeso en las plantas*. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/manganeso-en-las-plantas/>
- SIAP. (2018). *2012-2018 Food and agricultural atlas* (Primera Ed). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Agricultural-Atlas-2018](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Agricultural-Atlas-2018)
- Sieverding, E., & Toro, S. (1985). The genus *Entrophospora* in Colombia. *1st European Symposium on Mycorrhizae*, 621–626.
- Siqueira, J. O., Colizzi Filho, A., Oliveira, E. de, Fernandes, A. B., & Florence, M. L. (1987). Micorrizas vesicular-arbusculares em mudas de cafeeiro produzidas no sul do estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 22(1), 31–38. <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14192>
- Srinivasarao, C., & Manjunath, M. (2017). Potential of beneficial bacteria as eco-friendly options for chemical-free alternative agriculture. In *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives* (Vol. 2, pp. 473–493). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_19)
- Sun, J., Wang, M., Lyu, M., Niklas, K. J., Zhong, Q., Li, M., & Cheng, D. (2019). Stem and leaf growth rates define the leaf size vs. number trade-off. *AoB PLANTS*, 11(6). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plz063>
- TFI. (2014, May 14). *Fertilizer 101: The Big 3 - Nitrogen, Phosphorus and Potassium* | TFI | The Fertilizer Institute. The Fertilizer Institute. <https://www.tfi.org/the-feed/fertilizer-101-big-3-nitrogen-phosphorus-and-potassium>

- Trejo, D., Ferrera Cerrato, R., García, R., Varela, L., Lara, L., & Alarcón, A. (2011). Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(1), 23–31.  
<https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>
- UPOV. (2019). *¿Qué es una variedad vegetal?* <https://www.upov.int/overview/es/variety.html>
- van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406–1423.  
<https://doi.org/10.1111/nph.13288>
- Velásquez O., R. A. (2019). Guía de variedades de café. *Asociación Nacional Del Café, Anacafé*, 112, 48.  
<https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- World Coffe, R. (2018). Las Variedades del Café Arábica. In *World Coffee Research* (Primera Ed, p. 72). World Coffee Research.  
[https://worldcoffeeresearch.org/media/documents/las\\_variedades\\_del\\_cafe\\_arabica\\_v2\\_feb\\_2018.pdf](https://worldcoffeeresearch.org/media/documents/las_variedades_del_cafe_arabica_v2_feb_2018.pdf)