



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

## **EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN CULTIVOS DE CAFÉ**

**KATHIA PERALTA ZUÑIGA**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2021

La presente tesis titulada: **Emisiones de gases de efecto invernadero y dinámica de carbono y nitrógeno del suelo en cultivos de café** realizada por la alumna **Kathia Peralta Zuñiga**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



---

DRA. VINISA SAYNES SANTILLÁN

ASESOR



---

DR. JORGE D. ETCHEVERS BARRA

ASESORA



---

DRA. MA. DEL CARMEN A. GONZÁLEZ CHÁVEZ

ASESOR



---

DR. MARTÍN A. BOLAÑOS GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2021

# EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO EN CULTIVOS DE CAFÉ

Kathia Peralta Zuñiga, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

## RESUMEN

La producción mundial de café genera ingresos anuales ~200 mil millones de dólares. Sin embargo, la degradación del suelo, el uso inadecuado de insumos agrícolas y el cambio climático global (CCG) sitúan a este cultivo en un escenario de vulnerabilidad, pero también de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El manejo adecuado de estos cultivos puede ser parte de la solución a estos retos, pero es necesario un mejor conocimiento de las emisiones de GEI, la pérdida de fertilidad y degradación de los suelos que amenazan la productividad de los cafetales. Ante este escenario se realizó un diagnóstico del estado nutrimental de sistemas agroforestales (sombra y sol) y se relacionó esa condición con las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de los suelos. Se seleccionaron tres sistemas de producción de café (*Coffea arabica*) con plátano (*Musa paradisiaca*), café con mango (*Mangifera indica*), y café a pleno sol en el Estado de Veracruz. Se emplearon como indicadores del estado nutrimental características químicas del tejido foliar de las plantas, la hojarasca, el horizonte de fermentación y el suelo. En los tres sistemas de producción se midieron las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  de los suelos. Los principales resultados fueron: la concentración de carbono (C) en el tejido foliar fue 4.5 y 4 % mayor en los sistemas café-pleno sol y café-plátano respectivamente que en el sistema café-mango. La concentración foliar de nitrógeno (N) en el sistema café-mango fue 20 y 29 % mayor que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente. La relación carbono-nitrógeno del tejido foliar del sistema café-mango fue 31 y 24 % menor que en los sistemas café-pleno sol y café-plátano, respectivamente. La concentración foliar de zinc en el sistema café-pleno sol fue 20 y 24 % mayor en contraste con los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente. La concentración de N en la hojarasca del sistema café-plátano fue 29 % mayor en comparación con la correspondiente del sistema café-pleno sol. La emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo del sistema café-mango duplicó la de café-pleno sol. Se concluyó que la especie de árbol como sombra en el cultivo de café influye en la disponibilidad de nutrientes, así como en la concentración de C, materia orgánica del suelo y emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo. Los sistemas café-plátano y café-mango almacenaron mayor concentración de C y N en el horizonte de fermentación. La concentración de C, N, calcio, nitratos, materia orgánica del suelo y la emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo fue mayor en el suelo del sistema café-mango comparado con los sistemas café-plátano y café-pleno sol. El sistema café-mango tiene características favorables en su fertilidad físico-química que probablemente lo harían más resiliente a los efectos del CCG, además de tener potencial de mitigación de  $\text{CO}_2$  atmosférico. El análisis del ciclo de vida, mostró que la huella de carbono fue similar en los tres sistemas de producción de café. Y que el sistema café-mango es el que tuvo menor impacto ambiental.

**Palabras clave:** dióxido de carbono; hojarasca; horizonte de fermentación; nutrientes; óxido nitroso.

# GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON AND NITROGEN DYNAMICS FROM SOIL IN COFFEE CROPS

Kathia Peralta Zuñiga, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

## ABSTRACT

World coffee production generates annual revenues of US \$200 billion. However, soil degradation, the inappropriate use of agricultural inputs and global climate change (GCC) place this crop in a scenario of vulnerability, but also of greenhouse gas (GHG) emissions. Proper management of these crops can be part of the solution to these challenges, but a better understanding of GHG emissions, loss of fertility and soil degradation that threaten the productivity of coffee plantations is necessary. Given this scenario, a diagnosis of the nutritional status of agroforestry systems (shade and sun) was made and this condition was related to the emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) from the soils. Three coffee production systems were selected (*Coffea arabica*) with banana (*Musa paradisiaca*), coffee with mango (*Mangifera indica*), and coffee in full sun in the State of Veracruz. Chemical characteristics of the foliar tissue of the plants, the litter, the fermentation horizon and the soil were used as indicators of the nutritional status. Soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions were measured in the three production systems. The main results were: the carbon (C) concentration in the leaf tissue was 4.5 and 4 % higher in the coffee-full sun and coffee-banana systems respectively than in the coffee-mango system. The foliar nitrogen (N) concentration in the coffee-mango system was 20 and 29 % higher than in the coffee-plantain and coffee-full sun systems, respectively. The carbon-nitrogen ratio of the leaf tissue of the coffee-mango system was 31 and 24 % lower than in the coffee-full sun and coffee-banana systems, respectively. The foliar zinc concentration in the coffee-full sun system was 20 and 24 % higher in contrast to the coffee-mango and coffee-banana systems, respectively. The concentration of N in the litter of the coffee-plantain system was 29 % higher compared to that of the coffee-full sun system. The CO<sub>2</sub> emission from the soil of the coffee-mango system doubled that of coffee-full sun. It was concluded that the tree species as shade in coffee cultivation influences the availability of nutrients, as well as the concentration of C, soil organic matter and soil CO<sub>2</sub> emission. The coffee-banana and coffee-mango systems stored a higher concentration of C and N in the fermentation horizon. The concentration of C, N, calcium, nitrates, soil organic matter and the emission of CO<sub>2</sub> from the soil was higher in the soil of the coffee-mango system compared to the coffee-plantain and coffee-full sun systems. The coffee-mango system has favorable characteristics in its physico-chemical fertility that would probably make it more resilient to the effects of the GCC, in addition to having the potential for mitigating atmospheric CO<sub>2</sub>. The life cycle analysis showed that the carbon footprint was similar in the three coffee production systems. And that the coffee-mango system is the one that had the least environmental impact.

**Keywords:** carbon dioxide; litter; fermentation horizon; nutrients; nitrous oxide.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por permitirme realizar mis estudios en el Programa de Edafología y por el apoyo que recibí durante mi estancia en esta Institución.

Al Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Postgrado.

Agradezco a la Dra. Vinisa Saynes Santillán, por darme la oportunidad de trabajar con ella, por su tiempo, comprensión, apoyo y consejos que siempre me brinda. También le agradezco por compartir conmigo sus conocimientos y contribuir en mi desarrollo profesional, académico y personal, así como por su amistad. Muchas gracias.

Al Dr. Jorge D. Etchevers Barra, por sus enseñanzas a lo largo de mis estudios de Postgrado, por su tiempo y sus observaciones en este trabajo.

A la Dra. Ma. del Carmen A. González Chávez, por ser parte de esta investigación, por sus recomendaciones para la realización de este estudio, así como su disposición de tiempo.

Al Dr. Martín A. Bolaños González por su comprensión y apoyo que me ha brindado en mi desarrollo profesional y académico.

Al Dr. Felix Rafael Ramírez Arpide, por brindarme su apoyo en el análisis del ciclo de vida, así como su disposición de tiempo.

Al compañero Abraham de Jesús Romero, por brindarnos su apoyo durante la realización de este estudio, así como su disposición de tiempo y por la información compartida de este sitio.

A mi amiga Ana Lilia Aguilar García, por brindarme su comprensión y apoyo incondicional en todo momento y circunstancia. A Ilhuitl, Monse, Sergio, Rafaela, Sara, Rausell y Marcos, por el apoyo que recibí durante la realización de mis estudios de Postgrado.

A la MC. Juliana Padilla por el apoyo otorgado en la realización de mis análisis químicos en el laboratorio, así como Karen, Maciel y Francisco por ayudarme con la realización de los mismos.

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme llegar hasta aquí.

A mis papás, Senaida y Fidel por el apoyo que siempre recibo de ellos, así como su comprensión

A mis hermanas, Karen, Valeria y Lupita por brindarme su apoyo y ayuda en todo momento.

A mis abuelitas Esther y Ma. Cruz por el apoyo y el cariño que siempre me brindan.

A mis tías Lucía y Luisa por el apoyo que me brindan.

A todas las personas que fui conociendo durante la realización de mis estudios de Postgrado y que me ayudaron en la realización de este estudio.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	v
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
2.1. Escenario mundial en la producción de café .....	3
2.2. Escenario nacional en la producción de café.....	4
2.3. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).....	7
2.4. Circulación de carbono en ecosistemas terrestres .....	7
2.5. Descomposición de la materia orgánica del suelo .....	9
2.6. Circulación de carbono en los sistemas agroforestales .....	11
2.7. Ciclo de nitrógeno .....	13
2.7.1. Fijación de nitrógeno .....	14
2.7.2. Mineralización e inmovilización de nitrógeno .....	17
2.7.3. Nitrificación.....	18
2.7.4. Desnitrificación .....	19
2.8. Circulación de nitrógeno en los ecosistemas agrícolas .....	19
2.9. Evaluación del ciclo de vida .....	22
2.10. Mitigación de GEI en sistemas de producción agrícola .....	27
<b>3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	28
<b>4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	28
4.1. Objetivo general.....	28
4.1.1. Objetivos específicos .....	28
4.2. Hipótesis general .....	29
4.2.1. Hipótesis específicas.....	29
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	29
5.1. Fase de campo .....	29
5.1.1. Área de estudio .....	29

5.1.2.	Variables experimentales .....	30
5.1.3.	Variables de respuesta medidas .....	31
5.1.4.	Diseño experimental.....	32
5.1.5.	Recolección de muestras foliares.....	32
5.1.6.	Recolección de muestras de hojarasca y horizonte de fermentación.....	34
5.1.7.	Recolección de muestras de suelo.....	35
5.1.8.	Colecta de las muestras de GEI del suelo .....	36
5.1.9.	Análisis del ciclo de vida .....	39
5.2.	Fase de laboratorio.....	44
5.2.1.	Análisis en tejido vegetal.....	44
5.2.2.	Análisis en hojarasca y horizonte de fermentación .....	44
5.2.3.	Análisis en suelos.....	44
5.2.4.	Análisis de GEI.....	45
5.3.	Análisis estadístico .....	45
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
6.1.	Tejido vegetal .....	46
6.1.1.	Concentración de C y nutrientes .....	46
6.2.	Hojarasca y horizonte de fermentación.....	47
6.2.1.	Concentración de C en hojarasca y horizonte de fermentación .....	47
6.2.2.	Concentración de N en hojarasca y horizonte de fermentación .....	48
6.3.	Suelo.....	49
6.3.1.	Propiedades químicas.....	49
6.3.2.	Emisiones de gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> O) .....	53
6.4.	Análisis del ciclo de vida .....	54
<b>7.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>63</b>
7.1.	Tejido vegetal .....	64
7.2.	Piso forestal .....	66
7.3.	Suelo.....	67
7.4.	Análisis del ciclo de vida .....	74
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>9.</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>79</b>

<b>ANEXO I</b> .....	95
Análisis foliar .....	95
Preparación de la muestra .....	95
Macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) .....	96
Cuantificación de P total .....	97
Determinación de N y C total .....	97
Análisis de hojarasca y horizonte de fermentación .....	97
Preparación de la muestra .....	97
Determinación de C y N total .....	98
Análisis de suelos .....	98
Determinación de pH .....	98
Determinación de materia orgánica del suelo .....	98
Determinación de macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) .....	99
Determinación de P-lábil método Bray y Kurtz II .....	100
Determinación de la concentración de C y N total .....	100
Determinación de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	101
Determinación de contenido de humedad .....	101

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Categorías de impacto comúnmente usadas en el Ciclo de Vida.....	25
Cuadro 2. Ejemplo de cálculo de un factor de caracterización.....	25
Cuadro 3. Relación entre indicadores de impacto y áreas de agrupación .....	26
Cuadro 4. Metodología en campo y laboratorio. ....	31
Cuadro 5. Inventario del manejo agrícola de los sistemas de producción café- plátano, café-mango y café-pleno sol.....	41
Cuadro 6. Costos durante la etapa de producción en los sistemas de café-mango, café-plátano y café-pleno sol.....	42
Cuadro 7. Características químicas en las hojas del cultivo de café de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.....	46
Cuadro 8. Propiedades químicas del suelo de los sistemas de producción café- plátano, café-mango y café-pleno sol.....	51
Cuadro 9. Valores de impactos ambiental por 1 kg de café cereza en los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de café verde en el mundo, promedio del período 2015-2019 .....	3
Figura 2. Producción de café cereza por entidad federativa .....	4
Figura 3. Los cinco sistemas de producción de café en México .....	5
Figura 4. Principales factores que afectan la producción primaria bruta (PPB) en ecosistemas terrestres.....	10
Figura 5. Ciclo de nitrógeno.....	16
Figura 6. Cascada de nitrógeno.....	20
Figura 7. Distribución del Nr en el agroecosistema.....	21
Figura 8. Límites del sistema. ....	24
Figura 9. Ubicación del área de estudio.....	30
Figura 10. Muestreo experimental.....	33
Figura 11. Colecta de muestras foliares.....	34
Figura 12. Colecta de muestras de hojarasca .....	35
Figura 13. Colecta de muestras de horizonte de fermentación .....	35
Figura 14. Colecta de las muestras de suelo. ....	36
Figura 15. Recolección de las muestras de gas del interior de las cámaras,.....	36
Figura 16. Desplazamiento del aire del vial.....	37
Figura 17. Toma de muestra.....	38
Figura 18. Colocación del sensor digital en el interior de cada cámara para medir la temperatura del suelo.....	38
Figura 19. Medición de las alturas en cada cámara.....	39
Figura 20. Límites del ACV en los sistemas de producción de café-mango, café- plátano y café-pleno sol y coproductos que se generan en los sistemas de producción de café.....	40
Figura 21. Concentración de carbono en la hojarasca (a) y el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café- mango y café-pleno sol.....	47
Figura 22. Concentración de nitrógeno en la hojarasca (a) y en el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café- mango y café-pleno sol.....	48

Figura 23. Relación C:N en la hojarasca (a) y en el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol.....	49
Figura 24. Porcentaje de humedad en los suelos de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.. .....	52
Figura 25. Temperatura del suelo en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.. .....	52
Figura 26. Emisión de CO <sub>2</sub> de los suelos de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.. .....	53
Figura 27. Emisión de N <sub>2</sub> O de los suelos de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol.....	53
Figura 28. Impacto ambiental en los sistemas de producción café-plátano, café-mango, café-pleno sol. ....	55
Figura 29. Procesos de la producción de café, que contribuyen a las categorías de impacto ambiental del ACV en los sistemas café-plátano (a), café-mango (b) y café-pleno sol (c).....	56
Figura 30. Impactos ambientales de la producción de urea y NPK en las categorías del ACV de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.....	58
Figura 31. Variables analizadas en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.....	63

## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo, la pérdida de carbono orgánico del suelo y el desequilibrio de nutrientes amenazan la fertilidad de los suelos en el mundo (FAO & GTIS, 2015). El cultivo de café suele sembrarse en suelos de origen volcánico con pendientes pronunciadas (Clarke & Macrae, 1985; Descroix & Snoeck, 2004). Estos suelos generalmente tienen baja disponibilidad de nutrientes y problemas de erosión del suelo, factores que limitan la producción de café. Además de la baja fertilidad de suelos, otro factor que influye negativamente en la producción de café es el cambio climático global (CCG). Se estima que el CCG reducirá 50 % la superficie mundial apta para el cultivo de café (Bunn et al., 2015) y 60 % de las especies de café podrían desaparecer (Davis et al., 2019). A nivel global, las actividades que más contribuyen al CCG son la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo a través de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (UNEP, 2020). El sector agrícola también es una fuente importante de emisiones de GEI. En 2015, los sistemas alimentarios generaron una tercera parte de las emisiones totales de GEI (Crippa et al., 2021) procedentes principalmente del sector agrícola y el cambio de uso de suelo. Las actividades agrícolas, silvícolas y otros usos de la tierra (AFOLU por sus siglas en inglés) contribuyeron 81 % de las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en el período 2007-2017 (IPCC, 2019). Las emisiones de N<sub>2</sub>O, provienen principalmente del uso de los fertilizantes químicos, mismas que han aumentado 30 % durante las últimas cuatro décadas, lo cual equivale a 7.3 teragramos (Tg) de N por año (Tian et al., 2020). Se ha documentado que, en sistemas de producción de café, 70 % de las emisiones de GEI procedieron principalmente del uso excesivo o inadecuado de fertilizantes químicos (Ratchawat et al., 2020). El aumento de las emisiones de GEI, además de incrementar el calentamiento global, generan contaminación en cuerpos de agua, suelo, aire, pérdidas en la biodiversidad, deterioro y agotamiento de los recursos naturales. Debido a los efectos que puede provocar el CCG, es importante conocer cómo se forman los GEI, de donde provienen y proponer acciones que ayuden a la reducción en su emisión. Prácticas como la agroforestería, la aplicación de abonos orgánicos al suelo, el uso de variedades de cultivos eficientes en el uso de N (leguminosas), pueden reducir las emisiones de GEI en sistemas agrícolas (Mbow et al., 2019). Los sistemas de producción agroforestal pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>

atmosférico a través de la captura de C en la vegetación o en el suelo. Investigaciones muestran que la magnitud del C acumulado en la vegetación de sistemas agroforestales es mayor en comparación con otros sistemas como monocultivos o sistemas silvopastoriles (Espinoza-Domínguez et al., 2012; van Rikxoort et al., 2014). Estudios en sistemas agroforestales indican que el suelo es el principal almacén de carbono (C). Ávila et al. (2001) reportaron que más del 89 % del C almacenado en sistemas agroforestales correspondió al C del suelo. Los sistemas agroforestales además de contribuir a la reducción de CO<sub>2</sub> atmosférico ayudan a mantener y mejorar la fertilidad de los suelos. Se ha reportado que estos sistemas mejoran la tasa de infiltración de agua, aumentan el contenido de materia orgánica, así como la disponibilidad de N y fósforo en el suelo y reducen la erosión del mismo (Murray et al., 2014; Dollinger & Jose, 2018; Muchane et al., 2020).

El uso de herramientas en el sector agrícola como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) también nos permite estimar los impactos ambientales y emisiones de GEI que genera una actividad, proceso o servicio. Trinh et al. (2020) evaluaron el ACV en sistemas de producción de café y observaron que los sistemas con manejo intensivo convencional, moderado intensivo y orgánico convencional contribuyeron 85.5, 80.4 y 68 % respectivamente al calentamiento global a lo largo de los 30 años de cultivo. La aplicación del ACV es muy útil, porque nos permite elegir la actividad o proceso que genere menores impactos al ambiente y proponer acciones que ayuden a la reducción de los mismos.

La presente investigación busca generar información sobre la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestales de café en el estado de Veracruz, su potencial de captura de carbono y emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, así como evaluar el impacto ambiental en sistemas de producción de café a través del ACV. Esta información representa un comienzo para apoyar a productores en su integración a programas de pago por servicios ambientales, créditos de carbono y valorización en la cadena de producción del café.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Escenario mundial en la producción de café

El café es un cultivo importante en la economía global con una producción mundial que genera ingresos anuales mayores a 200 mil millones de dólares (Samper et al., 2017), representa una fuente de ingresos para 25 millones de pequeños productores quienes generan 80 % de la producción mundial de café (Fairtrade Foundation, 2020). El café se importa y exporta como grano verde, tostado-molido y café soluble. El grano verde representa 85 % de las importaciones y exportaciones totales (USDA, 2020).

En 2020, la producción total de café en los países exportadores fue de 10 millones de toneladas, de las cuales seis millones correspondieron a café arábica y el restante de la producción a café robusta (OIC, 2021). El café se siembra en más de 60 países, siendo los principales productores Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia, con producción promedio, en el período 2015-2019, de 2,983,722; 1,551,295; 839,235 y 702,739 toneladas de café verde, respectivamente (FAO, 2020) (Figura 1).

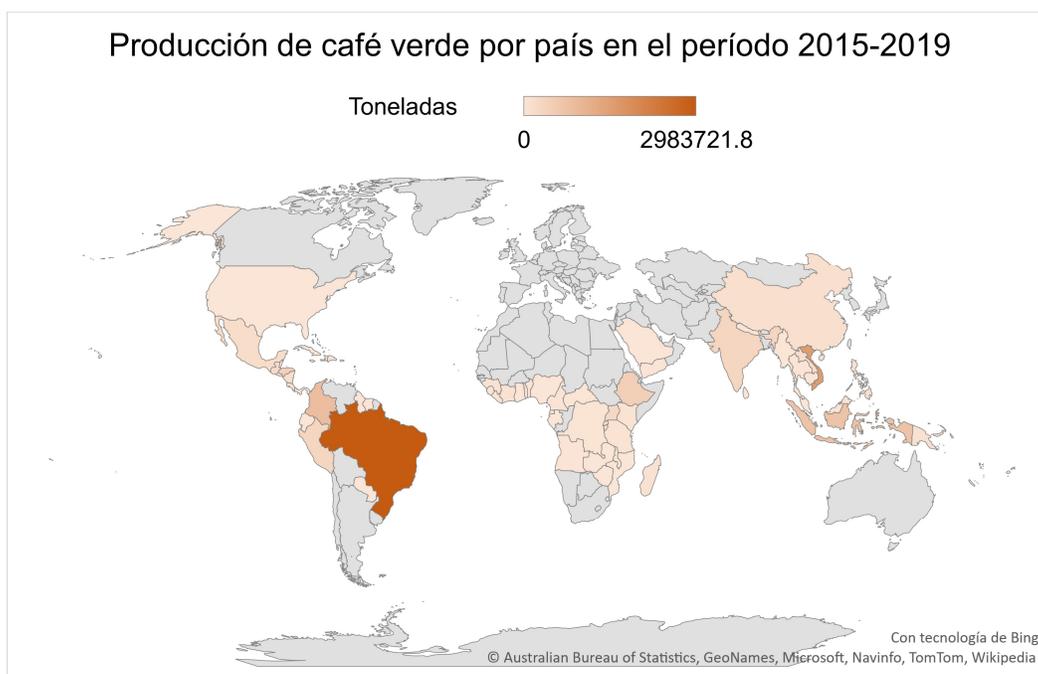


Figura 1. Producción de café verde en el mundo, promedio del período 2015-2019 (FAO, 2020).

Desde 1990, la producción global de café se ha incrementado más de 65 % debido a su alta demanda de consumo (OIC, 2019). Las regiones con mayor consumo de café son Europa, Asia-Oceanía y América del Norte que representan 33, 22 y 19 % del consumo mundial, respectivamente (OIC, 2021). A nivel de país, Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia son los principales consumidores de café, con un consumo por persona de 10 kg año<sup>-1</sup> (ITC, 2011).

## 2.2. Escenario nacional en la producción de café

En México trabajan más de 500 mil productores en el cultivo de café, 95 % de los cuales son campesinos con superficies menores de 5 hectáreas. El otro cinco por ciento corresponde a producción empresarial (CEDRSSA, 2018).

En el período 2018-2019, México ocupó el lugar número once en producción de café a nivel mundial con 900 mil toneladas de grano verde y valor comercial de 4,726 millones de pesos (SIAP, 2020). La superficie plantada con este cultivo es de 712,000 hectáreas (SIAP, 2019) distribuida en los estados de Chiapas, Veracruz y Puebla con 41, 24 y 16 % respectivamente, de la producción nacional (Figura 2) (SIAP, 2020).



Figura 2. Producción de café cereza por entidad federativa (SIAP, 2020).

En México, la producción de café ocurre principalmente bajo sombra y a pleno sol. Los cafetales bajo sombra son sistemas agroforestales que pueden clasificarse en sistemas de producción tradicional rusticano o de montaña, policultivo tradicional y policultivo comercial (Figura 3) (Moguel & Toledo, 1996). El sistema tradicional rusticano consiste en remover las plantas herbáceas y arbustivas del piso forestal de los ecosistemas naturales para introducir las plantas de café manteniendo la cubierta forestal original. El sistema policultivo tradicional consiste en introducir plantas de café y especies de plantas útiles como árboles frutales y plantas medicinales manteniendo la vegetación original. El sistema de policultivo comercial implica la remoción de la vegetación nativa y posterior introducción de árboles de sombra apropiados para el cultivo de café como plantas leguminosas del género *Inga spp.* o árboles con utilidad comercial como pimienta (*Pimenta dioica*), hule (*Castilla elástica*) y cedro (*Cedrela odorata*) (Moguel & Toledo, 1999). Aproximadamente 70 % de la superficie de café en México la ocupan sistemas tradicionales rusticano y de policultivo (Moguel & Toledo, 2004).

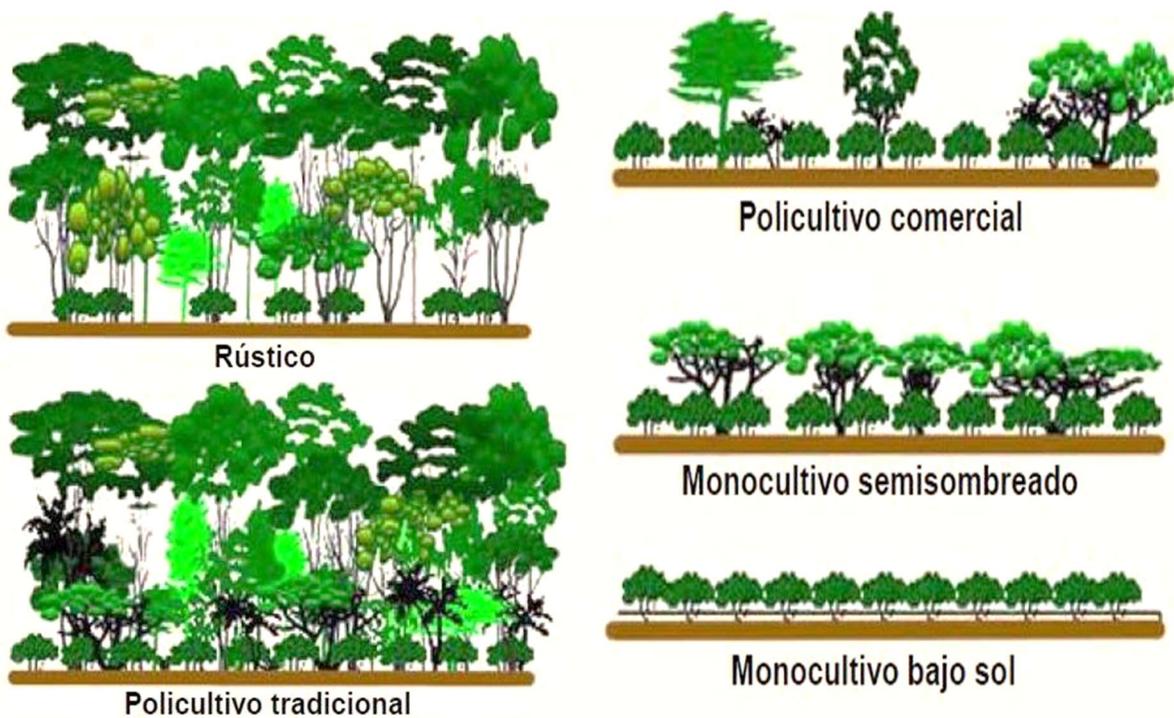


Figura 3. Los cinco sistemas de producción de café en México (Moguel & Toledo, 2004).

Independientemente del sistema que se utilice para su producción, en México el cultivo del café enfrenta grandes retos. En el período 2012-2016, la producción disminuyó 40 % a causa de la roya (SIAP, 2018), enfermedad causada por el hongo *Hemileia vastatrix* que ataca principalmente a las hojas del árbol de café (Guimarães et al., 2019). La disminución de la siembra del cultivo de café también se debe a su bajo precio (\$ 5-6 kg) (SIAP, 2020). Además de los patógenos y el escenario económico, otro factor que influye negativamente en la producción de café es la fertilidad de los suelos. En México, suelos fértiles como Phaeozems, Luvisoles y Vertisoles representan en conjunto 29 % de la superficie nacional (SEMARNAT, 2013). Estas cifras indican que un porcentaje limitado es adecuado para la producción agrícola. En general, el café suele cultivarse en suelos con topografía accidentada, derivados de cenizas volcánicas y materiales ígneos (Geissert & Ibáñez, 2008). Estos suelos requieren la adición de materia orgánica, así como la implementación de buenas prácticas agrícolas que eviten la pérdida de nutrientes del suelo por lixiviación o erosión.

Otros factores como el cambio de uso de suelo (de uso de suelo agrícola a pastizal) y el CCG también influyen negativamente en la producción de café. Varios estudios muestran que el CCG podría reducir la producción de café en México. Un estudio que se realizó en el estado de Veracruz (uno de los principales estados productores de café) mostró que el CCG reduciría hasta 34 % la producción durante el año 2020 (Gay et al., 2006). Los resultados de estos autores son congruentes con la realidad actual, ya que según lo publicado por el SIAP en 2020, la producción de café en Veracruz disminuyó 26 % comparada con la correspondiente en 2006 (SIAP, 2021). Otro estudio realizado en la región de Huatusco en Veracruz, indicó que el CCG puede afectar la etapa de crecimiento del fruto de café, a través de cambios en la disponibilidad de agua y el incremento de sequía durante la estación lluviosa (Villers et al., 2009). Similarmente, proyecciones para la región montañosa del este de Veracruz al año 2100 muestran que habrá incremento en la temperatura y reducción de 700 mm en la precipitación total anual, lo cual podría disminuir la producción de café (Esperón-Rodríguez et al., 2016). Otros estudios han informado que en el centro del Estado de Veracruz, la producción de café podría disminuir 7-10 % al 2050, debido a una reducción de la precipitación (Rivera Silva et al., 2013). Estos estudios indican que en México el café es un cultivo altamente

vulnerable a los efectos del CCG y se deben tomar acciones inmediatas encaminadas a la adaptación.

### **2.3. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**

México es uno de los países que puede resultar con mayores afectaciones por el CCG (PECC, 2014). Se estima que un incremento de 1.5°C o de 2°C en la temperatura global provocaría eventos extremos de sequía y precipitación que amenazarían la producción agrícola en muchas partes del mundo, y México no es la excepción (Hoegh-Guldberg et al., 2018).

Las actividades que contribuyen mayormente al CCG en México son el sector energía y el sector AFOLU, con 70 % y 14.5 % de emisiones de GEI respectivamente (SEMARNAT & INECC, 2018). Dentro del sector AFOLU, la ganadería genera 10 % de las emisiones de GEI, mientras que el restante 4.5 % corresponden a las actividades agrícolas.

Por tipo de gas, el CO<sub>2</sub> es el principal GEI que representa 72 % de las emisiones nacionales, seguido del CH<sub>4</sub> con 20 % y el N<sub>2</sub>O con 5.7 % (SEMARNAT & INECC, 2018). Las principales fuentes emisoras de CO<sub>2</sub> son el autotransporte y la generación de energía eléctrica. En el caso del CH<sub>4</sub> las emisiones se deben principalmente a la fermentación entérica de bovinos, mientras que las emisiones de N<sub>2</sub>O se deben mayoritariamente a la aplicación de los fertilizantes nitrogenados sintéticos.

México se encuentra entre los primeros 20 países con mayor generación de emisiones de GEI, de los 195 que considera las Naciones Unidas (SEMARNAT, 2020). Para enfrentar el CCG, México se comprometió de manera no condicionada (implementados con recursos propios del país) a reducir 22 % de las emisiones de GEI en el año 2030. Mientras que de forma condicionada (se requiere de apoyo de instrumentos financieros, técnicos y de fortalecimiento de capacidades), estas emisiones podrían reducirse hasta 36 % (Ley General de Cambio Climático, 2012; SEMARNAT, 2020).

### **2.4. Circulación de carbono en ecosistemas terrestres**

Los almacenes principales de carbono (C) en los ecosistemas terrestres son los suelos, la atmósfera y la vegetación, los cuales almacenan 1500, 790 y 620 Pg de C,

respectivamente (Batjes, 1996; Lal, 2004). Los suelos de los órdenes Histosoles, Inceptisoles y Gelisoles son los que almacenan mayor contenido de C (Weil & Brady, 2017).

El C ingresa a los ecosistemas terrestres a través del proceso de fotosíntesis (Chapin et al., 2002). En este proceso es crucial la energía del sol que las plantas utilizan en conjunto con el CO<sub>2</sub> atmosférico y el agua de la solución del suelo para producir compuestos orgánicos como azúcares (Silverstein et al., 2007). Las plantas usan estos compuestos para el desarrollo de sus tejidos o como fuente de energía (Weil & Brady, 2017). El proceso de fotosíntesis lo regulan, principalmente, la disponibilidad de luz y de CO<sub>2</sub> (Chapin et al., 2002). Hay estudios que muestran que la fertilización con CO<sub>2</sub> incrementa la tasa fotosintética. Saugier & Pontailier (2006) observaron que cuando se duplicó artificialmente la disponibilidad de CO<sub>2</sub>, también se duplicó la tasa fotosintética. Estos hallazgos muestran que los cambios en las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> tienen efecto en la circulación de C en los ecosistemas terrestres. Otros factores que limitan la tasa fotosintética son el suministro de N, la temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo (Campos, 2002; Chapin et al., 2002; Pace & Lovett, 2013). El suministro de N se requiere para producir las enzimas que realizan el proceso de fotosíntesis (Chapin et al., 2002). La enzima principal que fija el CO<sub>2</sub> atmosférico es la ribulosa-1-5 bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco) (Suárez, 1993). La disponibilidad de agua en el suelo y el suministro de N son factores que limitan el proceso de fotosíntesis. Liu et al. (2013) reportaron que el incremento de la disponibilidad de agua del suelo mejora la capacidad fotosintética y la combinación de un alto suministro de agua en el suelo y la adición de N aumentan significativamente la acumulación de biomasa (pero no de manera indiscriminada). Similarmente, Wang et al. (2012) observaron que la adición de N y el suministro de agua en el suelo mejoraron significativamente el crecimiento y la producción de biomasa en sistemas forestales. Así como las plantas cultivadas en condiciones de baja disponibilidad de agua, presentaron reducciones en la fotosíntesis (Mariño, 2014).

## **2.5. Descomposición de la materia orgánica del suelo**

En los suelos, gran parte del C se encuentra como el elemento principal que conforma a la materia orgánica del suelo (MOS), ya que representa entre 55 y 60 % de su masa (FAO & GTIS, 2015). 40 % restante de la MOS se constituye por oxígeno, hidrógeno y pequeñas cantidades de elementos como N, azufre, calcio, fósforo, potasio, etc. (Weil & Brady, 2017).

Cuando los tejidos de las plantas mueren, ingresan al suelo en forma de residuos y los descomponen una gran diversidad de organismos; sin embargo, microorganismos como hongos y bacterias realizan 80-90 % de la descomposición de los residuos orgánicos (Chapin et al., 2002). La descomposición se define como la transformación de materia orgánica en formas inorgánicas asimilables por las plantas y los microorganismos (Weil & Brady, 2017). La descomposición implica la interacción de tres procesos; lixiviación, fragmentación y transformación química de la materia orgánica (Luo & Zhou, 2006). La lixiviación es el proceso mediante el cual iones minerales y compuestos orgánicos solubles en agua (aminoácidos libres, ácidos orgánicos y azúcares) se transportan hacia partes más profundas del suelo (Chapin et al., 2002). La fragmentación es un proceso en el cual la fauna del suelo como lombrices, termitas, escarabajos y hormigas, desestructuran grandes fragmentos de materia orgánica en formas más pequeñas, asimilables por los microorganismos. Durante este proceso también se crean superficies nuevas para la colonización microbiana (Luo & Zhou, 2006). La transformación microbiana de residuos ocurre cuando hongos y bacterias secretan exoenzimas (enzimas extracelulares) para romper bioquímicamente los residuos orgánicos y convertirlos en formas simples (azúcares individuales, aminoácidos) y compuestos inorgánicos (amonio y CO<sub>2</sub>). Con la liberación paulatina de estos compuestos, la energía química almacenada también se libera y se vuelve disponible para cubrir la demanda energética de los microorganismos (Chapin et al., 2002). Simultáneamente, los microorganismos liberan CO<sub>2</sub> mediante el proceso de respiración (Findlay, 2013).

Cuando los residuos vegetales y animales se descomponen hasta que su estructura original es irreconocible se considera como MOS (Chapin et al., 2002).

La circulación de C ocurre en diferentes escalas espaciotemporales. En la Figura 4 se muestran los factores que regulan el ciclo del carbono. A largo plazo, la producción primaria neta (PPN), el tiempo, el material parental y el clima regulan la circulación de C y la descomposición de la MOS (Chapin et al., 2002). El calentamiento global y los cambios climáticos pueden disminuir las cantidades de MOS (Ondrasek et al., 2019).

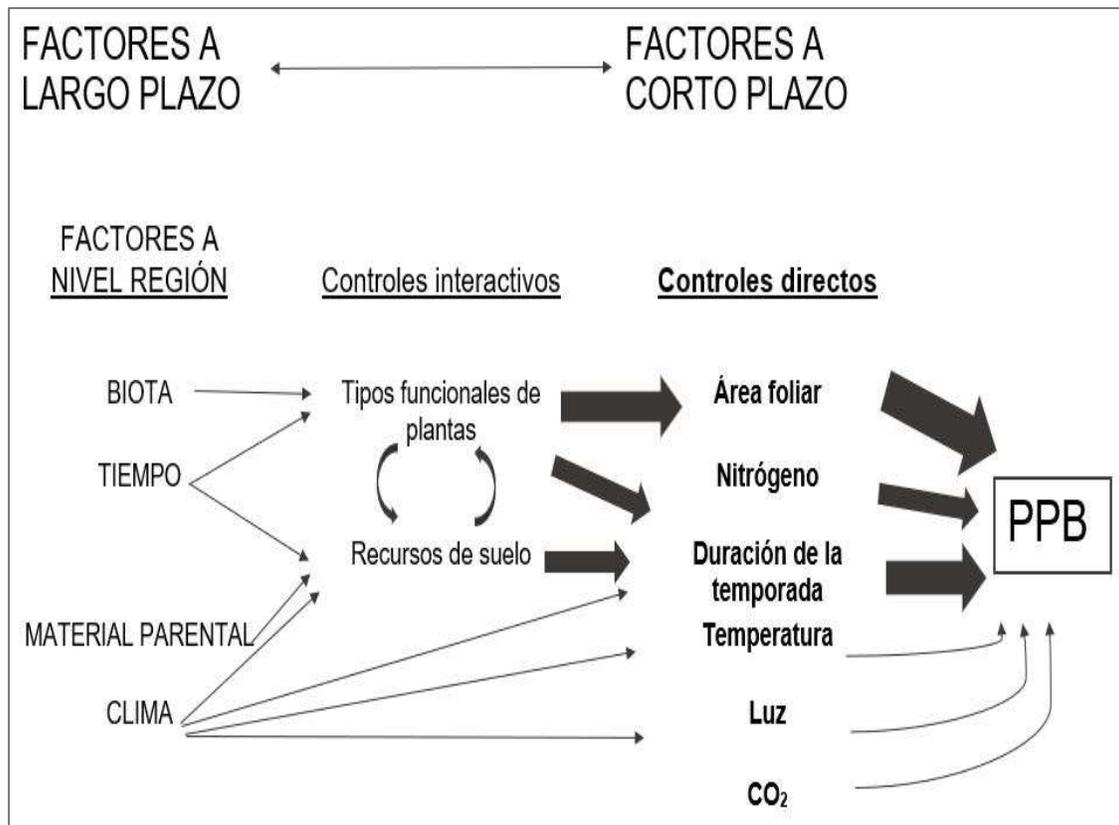


Figura 4. Principales factores que afectan la producción primaria bruta (PPB) en ecosistemas terrestres. Los controles interactivos y los factores a nivel región son las causas principales de la variación de la PPB entre ecosistemas. El grosor de las flechas asociadas con los controles directos es indicativo de la magnitud del efecto. Los factores que explican la mayor parte de la variación en la PPB entre ecosistemas son el área foliar y la duración de la estación fotosintética, los cuales dependen de los efectos interactivos de recursos del suelo, clima, vegetación y régimen de perturbación (Chapin et al., 2002).

Algunos factores que influyen en la descomposición de la MOS en escalas espaciotemporales cortas son la cantidad y calidad de C, su ubicación en el suelo y la relación C:N (Chapin et al., 2002; Weil & Brady, 2017). Por ejemplo, cuando los residuos orgánicos se incorporan al suelo, la descomposición de la MOS es más rápida en

comparación con aquellos suelos en los cuales los residuos se colocan sobre la superficie (Weil & Brady, 2017). La relación C:N de los residuos orgánicos puede utilizarse como índice de su calidad. En general, los tejidos vegetales tienen relación C:N alta (160:1) en comparación con la de la MOS (15:1) (Schlesinger, 1997). La composición química de los residuos orgánicos también puede regular la tasa de descomposición. Azúcares, almidones y proteínas simples se descomponen más rápido, en comparación con las ligninas y compuestos fenólicos (Weil & Brady, 2017). Otros factores que regulan la tasa de descomposición son la disponibilidad de oxígeno, la temperatura y la humedad del suelo (Wang & D'Odorico, 2008). El aumento de la temperatura generalmente induce incremento exponencial en la respiración microbiana que acelera la mineralización de la materia orgánica y produce CO<sub>2</sub> en el proceso (Chapin et al., 2002).

## **2.6. Circulación de carbono en los sistemas agroforestales**

Además de proveer nutrientes a las plantas, la MOS mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La MOS mejora propiedades físicas como la capacidad de retención de agua, su tasa de infiltración (Seguel et al., 2003), la estabilidad de los agregados (Aziz & Karim, 2016; Chen et al., 2017) y densidad aparente (Murray et al., 2014; Tejada et al., 2006). Ha sido ampliamente documentado que la MOS también mejora propiedades químicas del suelo como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Kaiser et al., 2008; Liu et al., 2020; Rodríguez & Hernández, 2012). La que se define como la suma total de cargas catiónicas intercambiables que un suelo puede retener y, generalmente estos cationes representan nutrientes disponibles para plantas y microorganismos.

La MOS también tiene un impacto directo en las propiedades biológicas de los suelos, siendo fuente de C y energía para los microorganismos del suelo (Chenu et al., 2015). La aplicación de materia orgánica al suelo influye en mayor población microbiana y actividad microbiana enzimática (Chang et al., 2014; Tejada et al., 2006).

Estas propiedades físicas, químicas y biológicas son fundamentales para mantener e incrementar la fertilidad de los suelos y elevar la productividad de los cultivos, y la MOS

es un aliado para mejorarlas y un indicador de calidad de los suelos. Por esta razón es necesario fomentar el incremento en el contenido de MOS. Diversas prácticas agronómicas pueden incrementar el contenido de MOS, entre ellas el establecimiento de sistemas agroforestales que llegan a elevar el contenido de MOS hasta 4 % después de varios años de haberse establecido (Murray et al., 2014). Además de aumentar el contenido de MOS, la agroforestería reduce la erosión del suelo, mejora la tasa de infiltración de agua, y la disponibilidad de nutrientes en el suelo como N y fósforo (P) (Dollinger & Jose, 2018; Muchane et al., 2020). Muchane et al. (2020) observaron que la agroforestería aumentó el almacenamiento de COS, N total, el N y el P disponibles en 21, 13, 46 y 11 % respectivamente, en comparación con un sistema de monocultivo. Similarmente, Garza-Lau et al. (2020) mostraron que la especie *Erythrina poeppigiana*, planta de sombra para café, promovió la fijación biológica de nitrógeno. Esto es consistente con lo reportado por Sileshi et al. (2014), quienes sugieren que la diversificación de los agroecosistemas con árboles fijadores de N puede acrecentar el suministro de este nutriente en el suelo, así como el contenido de MOS, aumentando así la productividad de las tierras degradadas.

La agroforestería también ayuda a almacenar C en el suelo y en la vegetación. van Rikxoort et al. (2014) identificaron mayor acumulación de C en la vegetación (árboles de sombra y plantas de café) en un sistema tradicional de policultivo de café con 42.5 Mg C ha<sup>-1</sup> en comparación con un sistema de monocultivo de café sin sombra con 10.5 Mg C ha<sup>-1</sup>. Similarmente, Espinoza-Domínguez et al. (2012) reportaron mayor cantidad de C arbóreo en un sistema agroforestal café-cedro rosado (114 Mg C ha<sup>-1</sup>) respecto a un sistema silvopastoril (2 Mg C ha<sup>-1</sup>). En sistemas agroforestales de Veracruz, registraron contenidos de C total (vegetación + suelo) de 188 Mg ha<sup>-1</sup> y 133 Mg ha<sup>-1</sup>, en un sistema de policultivo tradicional y en un sistema especializado-monocultivo de café con árboles del género *Inga*, respectivamente (Masuhara et al., 2015). Estas investigaciones indican que los sistemas agroforestales son capaces de almacenar mayores cantidades de C en la vegetación en comparación con otros sistemas como monocultivos o sistemas silvopastoriles. En sistemas agroforestales de café, el almacenamiento de C ocurrió en el siguiente orden, suelo > árboles de sombra > hojarasca > cultivo de café (Ehrenbergerová et al., 2016; Suárez Pascua, 2002). Suárez Pascua (2002), observó

que el suelo almacenó entre 75-97 % de carbono total del sistema, los árboles de sombra aportaron entre 5.6-14 %, la hojarasca almacenó 2.3-3.9 % y las plantas de café almacenaron el 0.1-1.5 %. En la Sierra Norte de Oaxaca, Figueroa-Navarro et al. (2005) asentaron que la concentración media de C en arbustos más hierbas de cafetales fue de 41.4 % y la concentración media de C en la hojarasca de cafetales fue de 42.3 %. Ehrenbergerová et al. (2016) documentaron que la mayor parte del C se fijó en el almacén del suelo (57-99 %), seguido de la biomasa aérea en árboles (23-32 %), biomasa subterránea de los árboles (8-9 %), arbustos de café (0.2- 2 %) y la hojarasca (1 %).

## **2.7. Ciclo de nitrógeno**

El N es un elemento esencial para los seres vivos ya que conforma estructuras biológicas indispensables para la vida. En las plantas, el N es esencial para su crecimiento, reproducción y desarrollo de biomasa ya que forma parte de ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas (Kersebaum et al., 2007). Las proteínas conforman los tejidos y enzimas que metabolizan reacciones bioquímicas que hacen posible procesos como la fotosíntesis y respiración celular (Copeland, 2004). El N también es un constituyente de compuestos de transferencia de energía, como el ATP (trifosfato de adenosina) que permite que las células conserven y usen la energía liberada en el metabolismo (Russell & Gilmore, 2018). El N además es un componente estructural de la clorofila, primordial en el proceso de fotosíntesis. Dada su importancia, ese nutriente vegetal se considera un elemento que limita la producción en ecosistemas terrestres y marinos (Vitousek & Howarth, 1991).

En la atmósfera, el N se encuentra en forma de dinitrógeno ( $N_2$ ) en una concentración aproximada de 79 % (Schlesinger, 1997). A pesar de su abundancia el triple enlace que une a los dos átomos que constituyen el  $N_2$  atmosférico, evita que sea accesible de forma directa a los microorganismos y plantas (Weil & Brady, 2017). El proceso que hace posible que el  $N_2$  sea disponible para los microorganismos y las plantas es la fijación de N.

### 2.7.1. Fijación de nitrógeno

La fijación de N consiste en transformar  $N_2$  a formas de N reactivo (Nr) (Galloway et al., 2003) (Figura 5). El Nr se refiere a aquellas formas de N (excepto el  $N_2$  y el N contenido en la materia orgánica del suelo y en la biota) capaces de combinarse con otros compuestos químicos en el medio ambiente. El Nr incluye formas de N como amoníaco ( $NH_3$ ), amonio ( $NH_4^+$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ),  $N_2O$ , nitrato ( $NO_3^-$ ) y formas orgánicas como urea, aminas, proteínas y ácidos nucleicos (Galloway et al., 2004). La fijación de N puede ocurrir de forma biológica (FBN), lumínica (por rayos) y antropogénica (Galloway et al., 1995). A nivel mundial, se estima que la FBN ingresa de 90 a 130 Tg N año<sup>-1</sup> a los ecosistemas terrestres (Galloway, 1998). La FBN es la vía principal de ingreso natural de N a los ecosistemas terrestres y ocurre a través de bacterias fijadoras de N. Las bacterias fijadoras de N pueden ser heterótrofas o fotótrofas de “vida libre” en suelos, sedimentos y aguas o bien, formar asociaciones simbióticas entre los productores primarios y microorganismos (Chapin et al., 2002). Los organismos fijadores de N fotótrofos producen su propio carbono orgánico a través de la fotosíntesis. En este grupo se encuentran las cianobacterias (algas verde-azules) que habitan en sistemas acuáticos y en la superficie de muchos suelos (Weil & Brady, 2017). Los microorganismos fijadores de N simbióticos son heterótrofos, dependen de los carbohidratos de las plantas para satisfacer las necesidades energéticas generadas durante el proceso de fijación de N (Groffman & Rosi-Marshall, 2013). Los microorganismos fijadores de N simbióticos más comunes son especies del género *Rhizobium* que se asocian con plantas de la familia *Fabaceae* y especies del género *Frankia* (bacterias actinomicetos) asociada con varias especies de los géneros *Alnus*, *Ceanothus*, y otras especies no leguminosas leñosas (Chapin et al., 2002). Las plantas y las bacterias crean una relación de simbiosis, donde las primeras proveen a las bacterias de energía a través de los carbohidratos y las bacterias suministran a la planta  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  para el desarrollo de compuestos esenciales como proteínas y clorofila (Chapin et al., 2002). Las bacterias fijadoras de N, forman nódulos en las raíces de las plantas y toman el  $N_2$  de la atmósfera y lo transforman en  $NH_3$  (Reacción 1). Esta transformación ocurre a través de la enzima nitrogenasa, que se produce en los nódulos de las raíces de las plantas leguminosas (Voet et al., 2007). Las condiciones para que se realice esta

reacción son disponibilidad de grandes cantidades de ATP (16 moles de ATP por mol de N<sub>2</sub> reducido), un ambiente anaeróbico (ya que la enzima nitrogenasa se desnaturaliza en presencia de oxígeno), suministro de hierro, magnesio y molibdeno que son requeridos para la actividad nitrogenasa así como una temperatura menor de 30 °C (Paracer & Ahmadjian, 2000).



Fijación biológica de N

Otro tipo de fijación natural de N, son las tormentas eléctricas. Los rayos que se generan en las tormentas eléctricas provocan que el N y el O<sub>2</sub> en la atmósfera se combinen y formen NO<sub>x</sub> (Reacción 2) (Hill & Kolb, 1999). Estos NO<sub>x</sub> reaccionan con el agua contenida en la atmósfera y forman HNO<sub>3</sub> (Reacción 3). El HNO<sub>3</sub> precipita sobre el suelo junto con la lluvia y reacciona con compuestos presentes en éste y el agua para formar NO<sub>3</sub> (Girard, 2013) que pueden absorberse directamente por las raíces de las plantas. Se ha estimado que mediante este tipo de fijación ingresan anualmente 5.4 Tg N (Lelieveld & Dentener, 2000).



El N también puede ingresar a los ecosistemas terrestres mediante fijación antropogénica. Existen tres tipos de actividades antropogénicas que generan N<sub>r</sub>, la producción de energía a través de la quema de combustibles fósiles, el proceso Haber-Bosh, que produce el N con el que se pueden elaborar fertilizantes sintéticos, y la siembra de leguminosas, que promueven la conversión de N<sub>2</sub> a N inorgánico a través de la FBN (Galloway et al., 2003). La combustión de combustibles fósiles convierte el N<sub>2</sub> y el N fósil a NO a través de altas temperaturas y presiones (Galloway, 2003). Mediante este proceso se fijan anualmente 30 Tg N (Fowler et al., 2013). A través de la siembra de leguminosas y otros cultivos que incrementan la FBN se fijan anualmente entre 40-70 Tg N en sistemas agrícolas (Galloway et al., 1995; Herridge et al., 2008). Herridge et al.

(2008) estimaron que los cultivos de leguminosas como soya y leguminosas forrajeras fijan anualmente 19 y 12-25 Tg N, respectivamente.

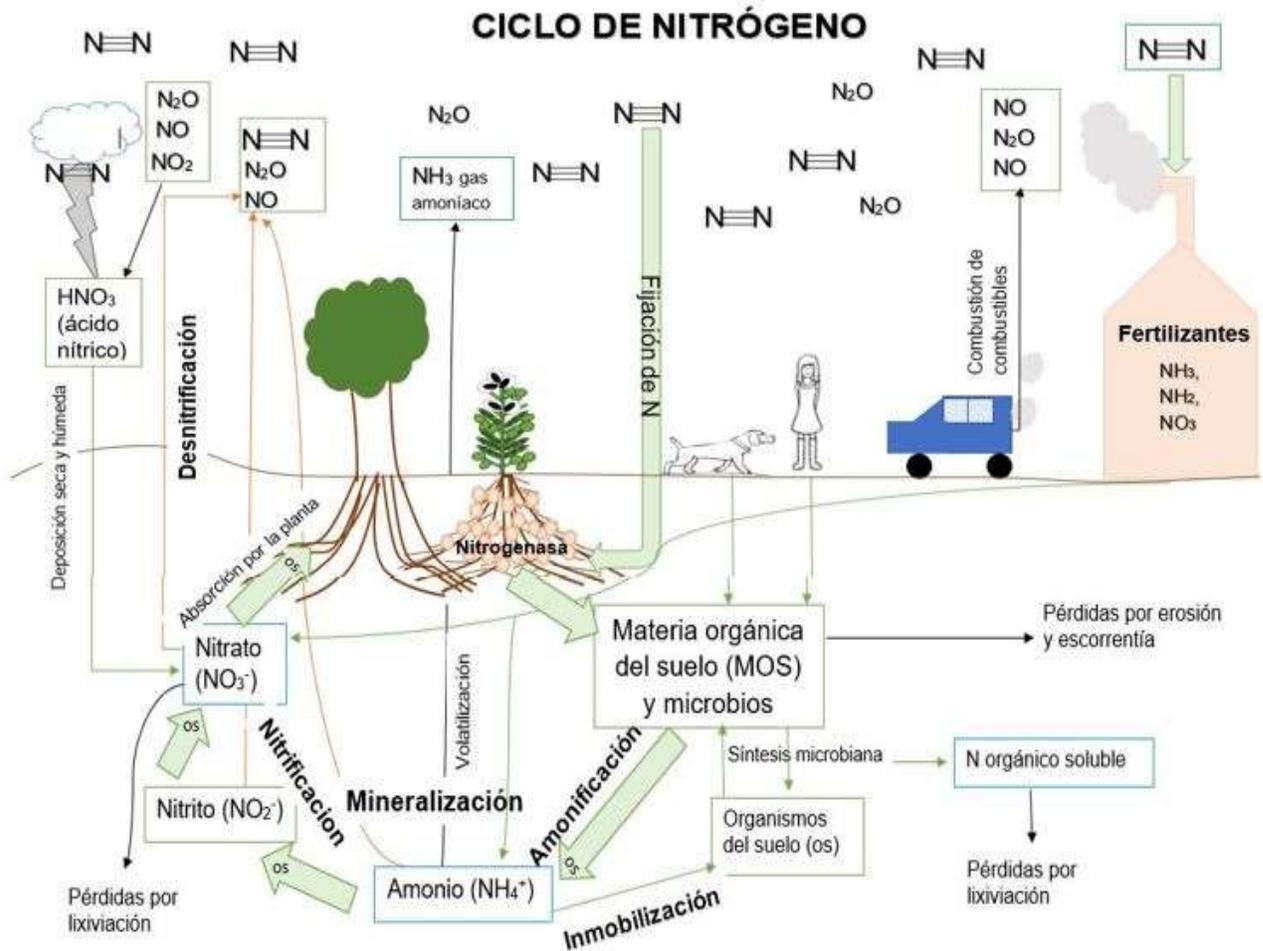


Figura 5. Ciclo de nitrógeno. Las flechas gruesas de color verde indican el ciclo primario en los suelos aeróbicos en el que los organismos del suelo (OS) realizan los procesos del ciclo del nitrógeno. Los cuadros representan las diferentes formas de nitrógeno. Las flechas representan los procesos de transformación de nitrógeno. Los cuadros en color azul representan las formas disponibles de nitrógeno que absorben las plantas. Las flechas naranjas representan los procesos anaeróbicos. Las flechas negras indican las pérdidas de nitrógeno del suelo (Weil & Brady, 2017).

A nivel mundial la principal entrada de  $N_r$  ocurre a través del proceso Haber – Bosh, mediante el cual se fijan anualmente 120 Tg N, y casi la totalidad de este N se utiliza en la fabricación de fertilizantes que se aplican en los sistemas agrícolas (Galloway et al.,

2008). Este proceso consiste en producir  $NH_3$  (Reacción 4) en condiciones de temperatura y presión muy altas (100–200 atmósferas), donde se utiliza hierro como catalizador (Dey & Harborne, 1997; Strohhfeldt, 2015). Aproximadamente 86 % de la fabricación de  $NH_3$  se usa para producir fertilizantes nitrogenados (Nieder & Benbi, 2008).



### 2.7.2. Mineralización e inmovilización de nitrógeno

El N que entra al suelo, por el proceso de fijación de N o por la adición de fertilizantes, se transforma principalmente por hongos y bacterias en formas disponibles para las plantas y los mismos microorganismos. Otra fuente de N soluble en los ecosistemas terrestres es la MOS. En ecosistemas naturales, entre 95 y 99 % del N presente en el suelo forma parte de la materia orgánica muerta derivada de plantas, animales y microorganismos (Chapin et al., 2002; Weil & Brady, 2017). Los microorganismos descomponen la materia orgánica muerta a través de la secreción de exoenzimas (proteasas, ribonucleasas, quitinasas) que les ayuda a romper grandes moléculas orgánicas insolubles que contienen N en formas más simples como aminas (Groffman & Rosi-Marshall, 2013). Cuando los microorganismos forman estos compuestos, el N contenido se libera en forma de N orgánico disuelto (NOD), haciéndolo disponible para soportar los requerimientos de N para su crecimiento (Chapin et al., 2002). Este proceso se conoce como mineralización (Coyne & Frye, 2005) (Representación 1) y lo regulan principalmente la temperatura y el contenido de agua en el suelo (Machado, 2005), la disponibilidad de NOD y N inorgánico, así como la actividad microbiana y su relación C: N (Chapin et al., 2002). El NOD representa entre 0.1–3 % del N total en los suelos, este valor es similar para el almacén de N inorgánico ( $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ ) (Weil & Brady, 2017).

El proceso opuesto a la mineralización es la inmovilización (Representación 2) (Coyne & Frye, 2005), mediante el cual se transforman los iones de N inorgánico en formas orgánicas, las cuales no son asimilables para los microorganismos (Groffman & Rosi-Marshall, 2013). La mineralización y la inmovilización ocurren simultáneamente en los suelos.

$N \text{ orgánico } (R - NH_2) \rightarrow NH_3 \rightarrow NH_4^+$  Representación 1. Mineralización de nitrógeno

$NH_4^+ \rightarrow N \text{ orgánico } (R - NH_2)$  Representación 2. Inmovilización de nitrógeno

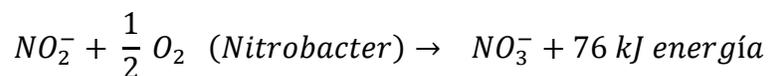
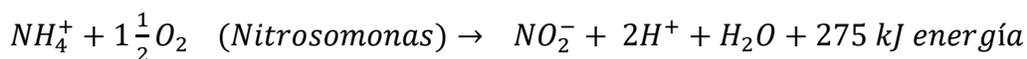
$NO_3^- \text{ o } NO_2^- \rightarrow NH_4^+ \rightarrow N \text{ orgánico } (R - NH_2)$ ...Representación 2. Inmovilización de nitrógeno

La hidrólisis de la urea es un ejemplo importante de mineralización en el suelo. Cuando la urea entra en el sistema suelo se hidroliza rápidamente y mediante la enzima ureasa se forma  $NH_4$  (Coyne & Frye, 2005).

### 2.7.3. Nitrificación

Cuando los iones  $NH_4^+$  permanecen en la solución del suelo, generalmente se oxidan a  $NO_2^-$  y posteriormente a  $NO_3^-$  en un proceso llamado nitrificación (Weil & Brady, 2017). Los iones de  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$  son formas de N fácilmente absorbibles por las plantas. Los microorganismos que realizan la nitrificación son bacterias nitrificantes autótrofas y heterótrofas, las primeras usan la energía de la oxidación del  $NH_4^+$  para fijar el C, mientras que las bacterias nitrificantes heterótrofas obtienen su energía al descomponer la MOS (Chapin et al., 2002). Las bacterias nitrificantes autótrofas del género *Nitrosomonas* convierten el  $NH_4^+$  a  $NO_2^-$ , mientras que las bacterias del género *Nitrobacter* convierten el  $NO_2^-$  a  $NO_3^-$  (Reacción 5) (Groffman & Rosi-Marshall, 2013; Weil & Brady, 2017). La nitrificación heterotrófica la realizan varias bacterias y hongos del género *Artrobacter*, *Streptomyces* y *Aspergillus* (Representación 3) (Coyne & Frye, 2005).

Reacción 5. Nitrificación autotrófica



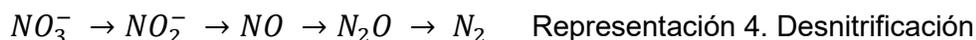
$N \text{ orgánico } (R - NH_2) \rightarrow NO_2^- \text{ o } NO_3^-$  Representación 3. Nitrificación heterotrófica

Aunque la nitrificación autótrofa predomina en muchos ecosistemas, la nitrificación heterótrofa puede ser importante en los ecosistemas con baja disponibilidad de N o en

suelos ácidos (Chapin et al., 2002). Los factores que regulan el proceso de nitrificación son el suministro de  $\text{NH}_4^+$ , aunque su concentración en exceso puede ser tóxica para *Nitrobacter* (Weil & Brady, 2017). Otro factor que afecta la nitrificación es la temperatura, el intervalo óptimo es de 20–35 °C (Ellis & Foth, 1996; Weil & Brady, 2017). Las bacterias nitrificantes requieren  $\text{O}_2$  para realizar la transformación de  $\text{NO}_2$  a  $\text{NO}_3$ , y el contenido óptimo de agua en el suelo para las bacterias es de 50-60 % (Greaves & Carter, 1920; Weil & Brady, 2017).

#### 2.7.4. Desnitrificación

Cuando el  $\text{NO}_3^-$  no lo absorben las raíces de las plantas, puede lixiviarse, o bien, puede transformarse a  $\text{N}_2$  mediante el proceso de desnitrificación. Este proceso lo realizan bacterias anaeróbicas que utilizan  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}$ , ó  $\text{N}_2\text{O}$  como aceptores de electrones y generan productos reducidos, que tienen como producto final el  $\text{N}_2$  (Representación 4) (Groffman & Rosi-Marshall, 2013).



### 2.8. Circulación de nitrógeno en los ecosistemas agrícolas

El  $\text{Nr}$  antropogénico se mueve a través de diferentes ecosistemas o bien se almacena temporalmente en ellos (Galloway et al., 2008). Este  $\text{Nr}$  puede tener efectos negativos en la atmósfera, en ecosistemas terrestres, acuáticos y en la salud humana. A estos efectos ambientales, así como a la transferencia y transformaciones de  $\text{Nr}$  se conoce como cascada de N (Figura 6) (Galloway et al., 2003). En la Figura 6 se muestran los efectos ambientales que puede tener un átomo de  $\text{Nr}$ . Uno de estos efectos ambientales importante es la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  de la solución del suelo. En general, la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  ocurre cuando hay una mayor infiltración de agua en el suelo. Los  $\text{NO}_3^-$  se mueven hacia partes más profundas del perfil del suelo, alcanzando los mantos freáticos hasta llegar a los cuerpos de agua (Weil & Brady, 2017). La acumulación de  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas puede contaminar el agua potable, causando peligros en la salud humana como es la metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul) y ciertos tipos de cáncer (Ward, 2009). En sistemas acuáticos, los iones  $\text{NO}_3^-$  provocan la eutrofización de cuerpos de agua y crecimiento masivo de algas, lo cual disminuye la concentración de

oxígeno en el agua e induce la muerte de peces y pérdida de biodiversidad (Matson, 2012).

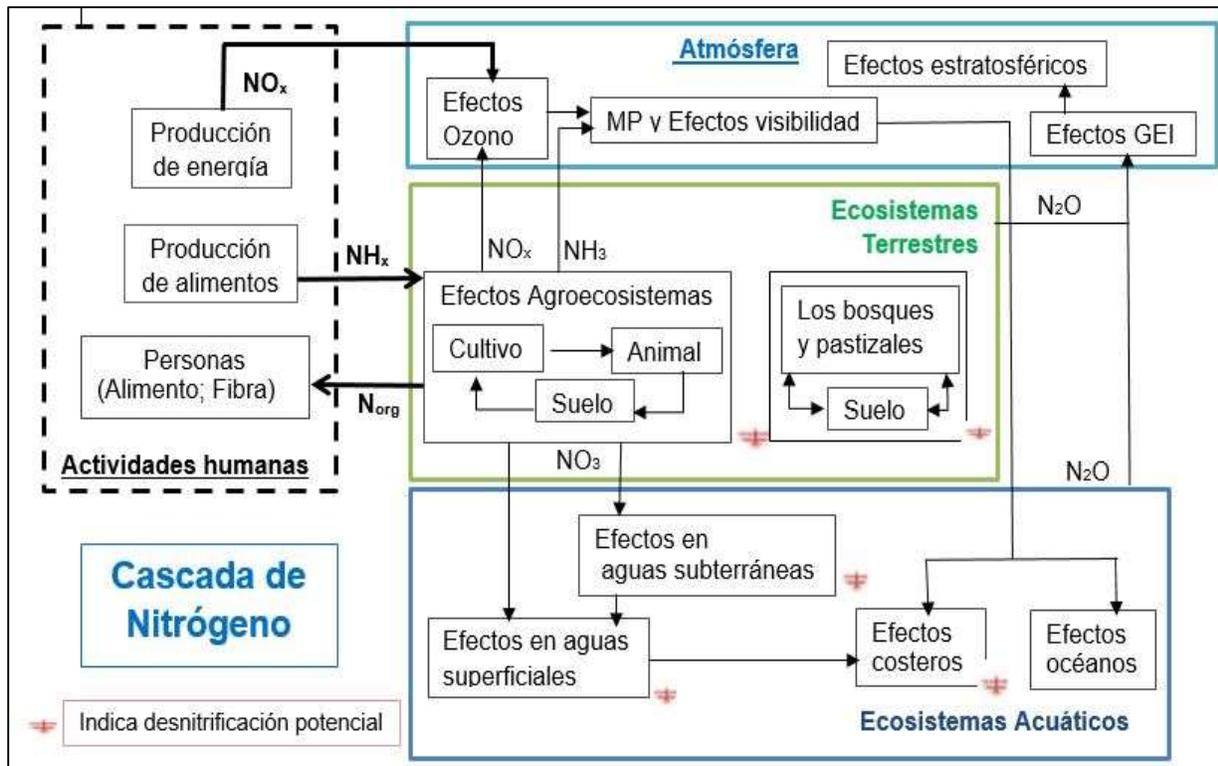


Figura 6. Cascada de nitrógeno. Movimiento del N en cascada mostrando los efectos secuenciales que un solo átomo de este elemento puede tener en varios depósitos después de que ha sido convertida de una forma no reactiva a una forma reactiva. GEI= gases de efecto invernadero; MP=materia particulada (Galloway et al., 2003).

Otro impacto ambiental del uso no sostenible del N es el aumento de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$ , derivada del uso inadecuado de fertilizantes orgánicos e inorgánicos. El  $\text{N}_2\text{O}$  contribuye al calentamiento global, ya que tiene un potencial global de calentamiento 298 veces mayor en comparación con el  $\text{CO}_2$  en una proyección a 100 años (Myhre et al., 2013) y una vida media de 121 años en la atmósfera (IPCC, 2001). Además de contribuir con el calentamiento global, el  $\text{N}_2\text{O}$  provoca la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera, lo que impacta negativamente la salud humana y los ecosistemas (Groffman & Rosi-Marshall, 2013). La aplicación de fertilizantes en dosis excesivas y el manejo del agua en el suelo son factores que regulan el proceso de desnitrificación durante el cual se generan emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$ . A nivel mundial, ingresan alrededor de  $170 \text{ Tg N año}^{-1}$  (Figura 7) a los agroecosistemas, de los cuales  $120 \text{ Tg N año}^{-1}$  provienen de  $\text{N}_r$  de nuevo

ingreso (fertilizantes y cultivos que inducen la FBN) y 50 Tg N año<sup>-1</sup> que provienen de Nr añadido anteriormente (por ejemplo, residuos de cosechas, estiércol y la deposición atmosférica) (Smil, 2002, 2004). Del total del N que ingresa (170 Tg N año<sup>-1</sup>) a los sistemas de producción, ~33 Tg N año<sup>-1</sup> lo consumen animales y 16 Tg N año<sup>-1</sup> humanos. El N remanente (alrededor de 121 Tg N año<sup>-1</sup>) se pierde a través de emisiones a la atmósfera (NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>), se lixivia (como N disuelto y partículas de Nr) o forma parte del material que se reintroduce a los sistemas de cultivo durante el próximo ciclo (Galloway et al., 2003).

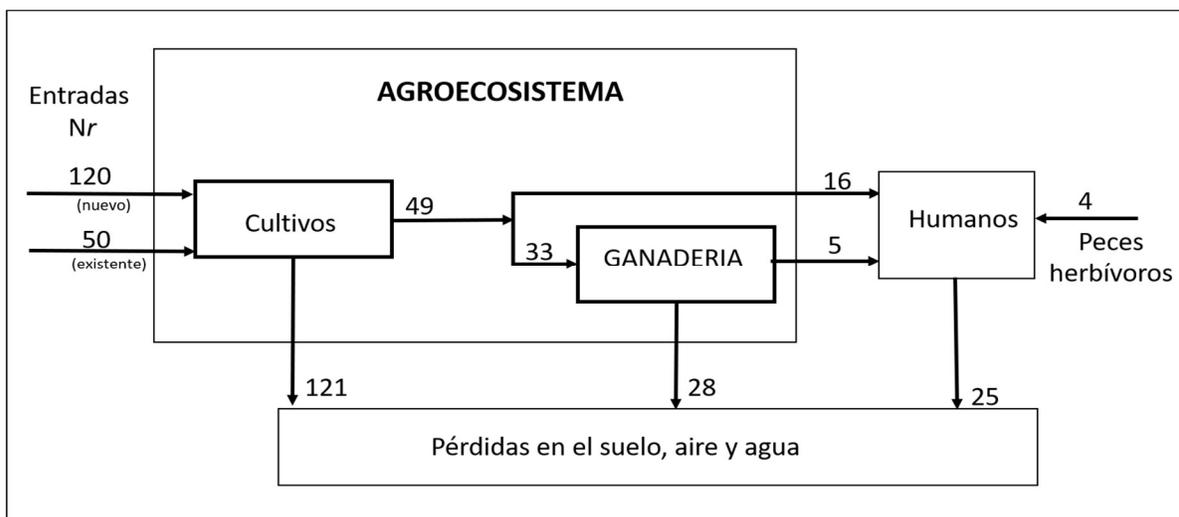


Figura 7. Distribución del Nr en el agroecosistema. Donde Nr: nitrógeno reactivo. El significado del número sobre las flechas (→) es la cantidad de N (Tg N año<sup>-1</sup>) que ingresa a los diferentes componentes del sistema (Tierras de Cultivo, Ganadería, Humanos) y los números junto a las flechas (↓) indican las pérdidas de N (Tg N año<sup>-1</sup>) (Galloway et al., 2003).

En sistemas de producción de café 70 % de las emisiones de GEI procedieron principalmente del uso de fertilizantes químicos (Ratchawat et al., 2020). Similarmente, en un sistema de monocultivo de café con dosis de fertilización altas y medias (150 kg N, 44 kg P y 62 kg K ha<sup>-1</sup> durante el primer año; 300 kg N, 87 kg P y 125 kg K ha<sup>-1</sup> en el segundo año), además de producir altos rendimientos e ingresos económicos también producen altas emisiones de N<sub>2</sub>O (Capa et al., 2015). Estas cifras muestran que solo una pequeña parte del Nr es aprovechado por plantas, animales y para el consumo humano, la mayoría del Nr se pierde en el ambiente. Liu et al. (2016) estimaron que en 2030, se necesitarán 100 Tg N año adicionales a los 170 Tg N año para alimentar a 9 mil millones

de personas. Probablemente el uso de los fertilizantes nitrogenados aumentará, y con ello las emisiones de  $N_2O$  y la lixiviación de  $NO_3$  y sus efectos ambientales adversos. Las emisiones de GEI se generan a lo largo de la cadena de producción de alimentos y no únicamente en los sistemas de producción agropecuarios. Globalmente, entre 21 y 37 % de las emisiones totales de GEI se producen en los sistemas agro alimentarios (IPCC, 2019). Estas emisiones provienen principalmente del sector agrícola y las actividades de cambio de uso de la tierra (71 %), el restante de las emisiones procede de las actividades de la cadena de producción: comercio, transporte, consumo, producción de combustibles, gestión de residuos, procesos industriales y empaque (Crippa et al., 2021).

## **2.9. Evaluación del ciclo de vida**

El uso excesivo de insumos agrícolas (fertilizantes y plaguicidas), así como la intensificación de los sistemas de cultivo y ganaderos contamina suelos, aguas y aire, además del deterioro de tierras de cultivo. En algunas regiones estas tierras son cada vez más infértiles, con problemas de compactación, salinidad y bajo contenido de MOS (FAO & GTIS, 2015). Estas condiciones adversas hacen difícil la producción de cultivos, que resulta en bajos rendimientos y amenazan la seguridad alimentaria. El CCG ha cambiado los patrones de precipitación y temperatura en muchas regiones, provocando que varios cultivos sean susceptibles a estos cambios. La implementación de sistemas de producción sostenibles es primordial, para evitar el deterioro de los recursos naturales, especialmente la pérdida de fertilidad del suelo. Actualmente hay una variedad de herramientas que estiman los impactos ambientales que puede generar una actividad, producto o servicio, por ejemplo la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), el Análisis de Flujo de Material (MFA) y el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (Andersson et al., 2016). El ACV (SAIC, 2006) estima las emisiones totales de GEI, también conocidas como huella de carbono de un producto, proceso o servicio, y se expresa como dióxido de carbono equivalente ( $CO_2$  eq) por unidad de producto o servicio. El  $CO_2$  eq puede incorporar emisiones de diversos GEI incluyendo aquellos gases distintos del  $CO_2$  como el  $CH_4$  y el  $N_2O$ .

El ACV está acreditado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) mediante las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) y 14044 (ISO, 2006b). La metodología del ACV para cuantificar la huella de carbono incluye cuatro etapas:

(1) Objetivo. En esta etapa se define el objetivo y los límites del sistema que se evaluará. El objetivo debe responder a las preguntas, ¿cuál es el propósito del estudio?, ¿qué se quiere comparar?. En esta pregunta es importante definir la unidad funcional (UF) que es una referencia dónde se normalizan matemáticamente todos los datos de entradas y salidas del sistema estudiado (White et al., 2012). Algunos ejemplos de UF son unidad de material (kg de acero de composición), unidad de energía (kW hora de electricidad) o la unidad de servicio (un litro de leche) (Jonker & Harmsen, 2012). Los límites del sistema especifican las etapas del producto que se evaluarán, lo cual generalmente está en función de la información y del conocimiento que se tenga del producto. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de los límites del sistema (SAIC, 2006).

(2) Inventario. La etapa de inventario determina y recaba la información de las entradas y salidas (impactos ambientales) de la actividad o producto y las vincula con los impactos ambientales y/o de salud, o de ambos, que pueda generar dicha actividad como emisiones atmosféricas, residuos de aguas residuales entre otras emisiones que se puedan generar durante el ciclo de vida (Curran, 2016). En esta etapa generalmente se hace un diagrama especificando las entradas y salidas como se muestra en la Figura 8.

(3) Evaluación. En la etapa evaluación del impacto del ciclo de vida, los impactos ambientales se clasifican en categorías y la información del inventario se agrupa en dichas categorías. En el Cuadro 1 se muestra un ejemplo de categorías por impacto. Una vez que las categorías se agrupan, se transforman en indicadores de impacto a través de factores de conversión o caracterización. La clave para caracterizar el impacto es usar el factor de caracterización apropiado (Curran, 2016). En el Cuadro 2 se muestra un ejemplo de cálculo de un factor de caracterización para el potencial de calentamiento global.

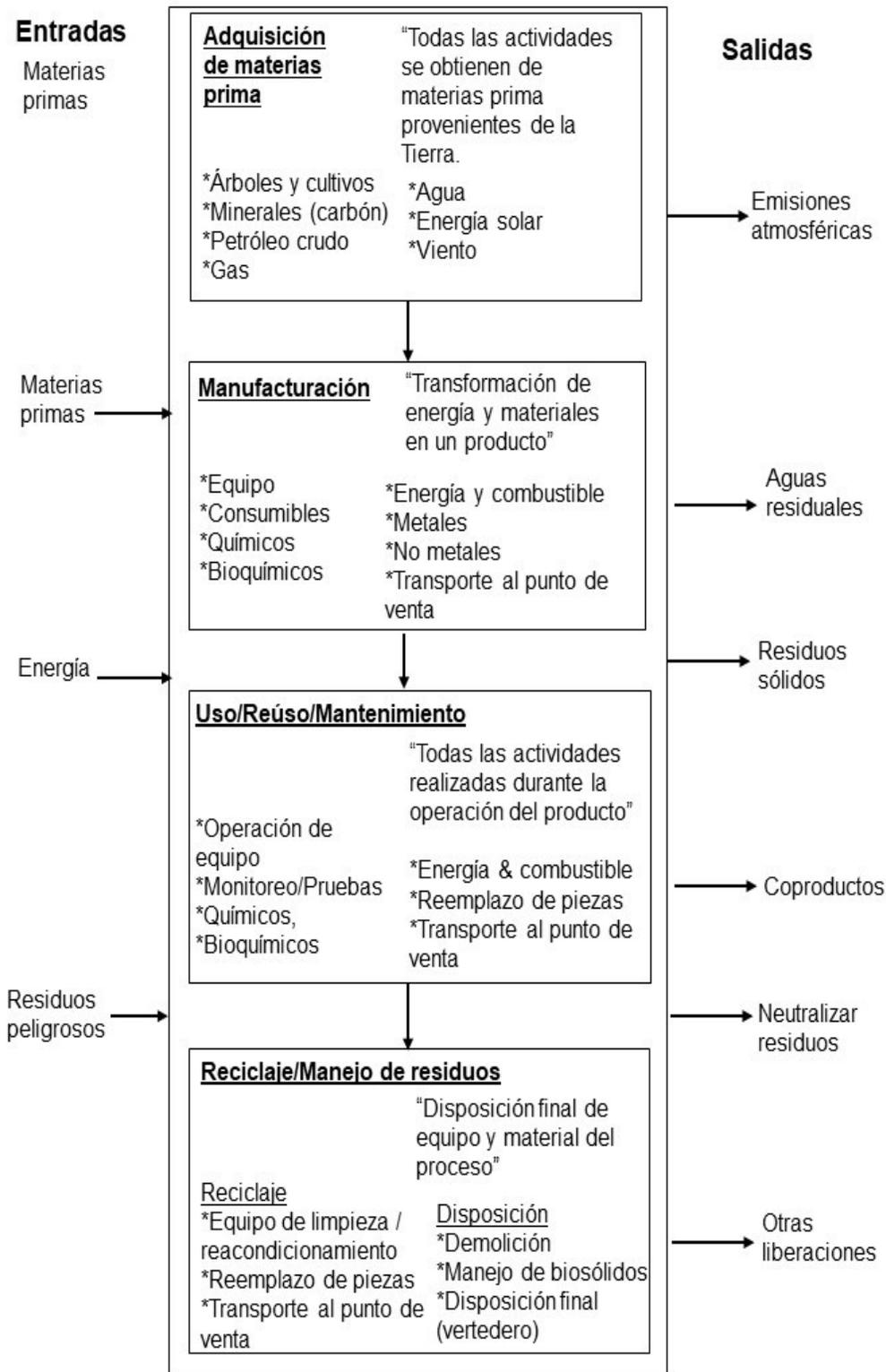


Figura 8. Límites del sistema (SAIC, 2006).

Cuadro 1. Categorías de impacto comúnmente usadas en el Ciclo de Vida (SAIC, 2006).

Categoría de Impacto	Escala	Ejemplos de datos del Inventario (clasificación)	Posible Factor de caracterización	Descripción del Factor de caracterización
Calentamiento global	Global	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Metano (CH <sub>4</sub> ) Clorofluorocarbonos (CFCs) Hidrofluorocarbonos (HCFCs) Bromuro de metilo	Potencial de calentamiento global	Convierte el dato del inventario a dióxido de CO <sub>2</sub> eq. Nota. El potencial de calentamiento global puede ser 50, 100 o 500 años
Deterioro del ozono estratosférico	Global	Clorofluorocarbonos (CFCs) Hidrofluorocarbonos (HCFCs) Halones Bromuro de metilo	Deterioro del ozono potencial	Convierte el dato del inventario triclorometano equivalente
Acidificación	Regional Local	Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) Ácido clorhídrico (HCl) Ácido fluorhídrico (HF) Amoníaco (NH <sub>4</sub> )	Acidificación potencial	Convierte el dato del inventario a ion hidrógeno (H <sup>+</sup> ) equivalente

Cuadro 2. Ejemplo de cálculo de un factor de caracterización (Curran, 2016). PGC: potencial global de calentamiento.

Datos	Cálculo
CO <sub>2</sub> liberado = 9000 t ---- 0.009 Tg PGC CO <sub>2</sub> =1	PGC CO <sub>2</sub> = 0.009 Tg x 1 =0.009 Tg CO <sub>2</sub> eq
CH <sub>4</sub> liberado = 5000 t ---- 0.005 Tg PGC CH <sub>4</sub> =23.	PGC CH <sub>4</sub> = 0.005 Tg x 23 = 0.115 Tg CO <sub>2</sub> eq

Cuando los indicadores de impacto se transforman a UF, se agrupan por características, lugar o sistemas jerárquicos. En el Cuadro 3 se muestra un ejemplo de la agrupación de los indicadores de impacto. Finalmente, se hace una ponderación a los indicadores asignándoles valores de acuerdo con su importancia y relevancia.

Cuadro 3. Relación entre indicadores de impacto y áreas de agrupación (Curran, 2016).

	Indicadores de Impacto	Áreas de agrupación
Resultados del Inventario del ciclo de vida	Cambio Climático	Salud humana
	Agotamiento de ozono	
	Toxicidad humana	
	Inorgánicos respiratorios	
	Radiación ionizante	Ambiente natural
	Ruido	
	Accidentes	
	Ozono fotoquímico	
	Formación	
	Acidificación	
	Eutrofización	Recursos naturales
	Ecotoxicidad	
	Uso de la tierra	
	Deterioro de recursos	
Salinización		

(4) Interpretación. La etapa de interpretación consiste en revisar y evaluar la integridad de los datos que se generan en el inventario y evaluar con la finalidad de generar conclusiones y recomendaciones (SAIC, 2006).

El ACV es una herramienta útil en una gran variedad de sectores, incluyendo el de producción de alimentos. En este sector, el ACV contribuye a conocer en qué fase de la cadena de producción se genera mayor cantidad de emisiones de GEI, o pérdidas de alimentos, y a proponer acciones o procesos que ayuden a reducir estos efectos. En el caso de la producción agrícola, el ACV es útil en la evaluación del manejo agrícola, por ejemplo, en el uso de los fertilizantes y la identificación del manejo agronómico que libera mayores emisiones de GEI. El ACV es útil para determinar los impactos ambientales de la cadena de valor del café, y se conoce que las etapas agrícolas y de consumo generan mayores emisiones e impactos al ambiente (Salomone, 2003) en comparación con otras etapas como transporte (Salinas, 2008). Por otro lado, cuando se evalúa el ciclo de vida en tiempo real para la preparación de una taza de café, la huella de carbono es de 50.9 g de CO<sub>2</sub> eq y energía no renovable equivalentes a 151 kJ (Domínguez et al., 2014).

## **2.10. Mitigación de GEI en sistemas de producción agrícola**

Una alternativa para la mitigación de las emisiones de GEI que se genera en la producción de cultivos es la intensificación sustentable y un ejemplo de ello es el establecimiento de acciones nacionales apropiadas de mitigación (NAMAs). Estas acciones son voluntarias y se enfocan en reducir emisiones de GEI, las cuales deben alinearse con políticas nacionales y sectoriales, y generar co-beneficios (Pezo et al., 2019). En el caso del café es posible la optimización de la agricultura realizada por grandes y pequeños productores, pero es necesario contar con un conocimiento profundo del sistema planta-suelo- atmósfera.

En México, la identificación de las acciones pertinentes para el desarrollo de NAMAs, así como de sistemas de monitoreo, reporte y verificación de emisiones de GEI en conjunto con los actores involucrados en la producción de café, es un tema poco estudiado y un área de oportunidad (Paz-Pellat & Libert, 2019). Parte fundamental para avanzar en esta área es transitar hacia el logro de sobrepagos del producto mediante la certificación de producción de café siguiendo esquemas de desarrollo bajo en C y la conservación de la biodiversidad en los cultivos de café (Soto-Pinto et al., 2005). Sin embargo, no es posible transitar a esta etapa sin la generación de conocimiento básico del sistema de producción de café, incluyendo la fertilidad de los suelos, los procesos que regulan la circulación de C y N, su captura en el sistema planta-suelo y sus emisiones a la atmósfera. El ACV es una herramienta clave en la estimación de la huella de carbono de diferentes escenarios de manejo en estos cultivos.

La presente investigación generará conocimiento de los agroecosistemas cafetaleros. Este nuevo conocimiento puede coadyuvar en el incremento de la eficiencia en la producción de café mediante un análisis preliminar que incluya la identificación de las fuentes de emisiones de GEI en la etapa de producción, y las alternativas para reducir emisiones de GEI. Así como el desarrollo de lineamientos para el acceso a bonos de carbono. No es el objetivo de este estudio la implementación de una NAMA, actividad compleja que puede tomar años de investigación y ejecución. Pero si es necesario comenzar a identificar las áreas de oportunidad en materia de mitigación y optimización del cultivo de café.

### **3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

Con la presente investigación se generará información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, la fertilidad de los suelos y la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas de producción de café, con diferentes tipos de sombra (especies arbóreas) en la segunda región más importante de producción de café del país. Además, esta información servirá como referencia para la generación de una línea base de emisiones (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) en los suelos de los sistemas de estudio. También, esta información se usará para evaluar la contribución al cambio climático en la fase de producción agrícola y estimar los efectos ambientales y huella de carbono en los distintos sistemas de producción de café. Adicionalmente, se contribuirá al mejoramiento de oportunidades para la inserción de los productores en el mercado de C.

### **4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

#### **4.1. Objetivo general**

Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero y dinámica de carbono y nitrógeno en el sistema planta-suelo en tres sistemas de producción: café-mango, café-plátano y café a pleno sol.

##### *4.1.1. Objetivos específicos*

1. Conocer el estado nutrimental de las hojas en cultivos de café en tres sistemas de producción de café.
2. Evaluar la dinámica de carbono y nitrógeno, tanto hojarasca como horizonte de fermentación, en tres sistemas de producción de café.
3. Hacer un diagnóstico de la fertilidad del suelo mediante indicadores químicos, evaluar emisiones de GEI del suelo y la dinámica de carbono y nitrógeno en tres sistemas de producción de café.
4. Estimar los efectos ambientales y huella de carbono de la producción agrícola en tres sistemas de producción de café a través del Análisis del Ciclo de Vida.

## **4.2. Hipótesis general**

La especie del árbol influye en la disponibilidad de nutrientes y emisión de GEI del suelo, por lo que en los sistemas bajo sombra hay mayor disponibilidad de nutrientes en los suelos y menor emisión de GEI en comparación con el sistema de producción a pleno sol.

### *4.2.1. Hipótesis específicas*

1. Las concentraciones de macro y micronutrientes en las hojas de café son mayores en los sistemas de producción bajo sombra que en el sistema de producción a pleno sol.
2. La concentración de carbono y nitrógeno en la hojarasca y el horizonte de fermentación son superiores en los sistemas de producción bajo sombra que en el sistema de producción a pleno sol.
3. Las concentraciones de materia orgánica del suelo, macro, micronutrientes y las emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo son inferiores en el sistema de producción a pleno sol que en suelos de producción bajo sombra. Las emisiones de N<sub>2</sub>O en el suelo son mayores en el sistema de producción a pleno sol que en suelos de producción bajo sombra.
4. Los impactos ambientales y la huella de carbono son menores en los suelos de producción de café bajo sombra que en el sistema de producción a pleno sol.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Fase de campo**

#### *5.1.1. Área de estudio*

La presente investigación se realizó en el estado de Veracruz, municipio Emiliano Zapata, en la localidad de La Tinaja (Figura 9). La Tinaja (LN 19°30'57.936" N y LO 96°45'18.024" W) se encuentra a una altitud de 901 msnm (INEGI, 2021). Las temperaturas medias máxima y mínima anual son 30.7 y 19.4 °C, respectivamente. La temperatura media anual es de 25.1 °C y la precipitación media anual es de 909.9 mm (SMN, 2021). El clima es cálido subhúmedo (Aw) (INEGI, 2008). Los suelos que dominan

en el municipio son Phaeozem, Leptosol y Vertisol (INEGI, 2007). El suelo en la localidad es Phaeozem con textura media (francos, equilibrados en el contenido de arena, limo y arcilla) (INEGI, 2007). Según INEGI (2014) los suelos son fértiles en magnesio, potasio y sin carbonatos en el subsuelo.

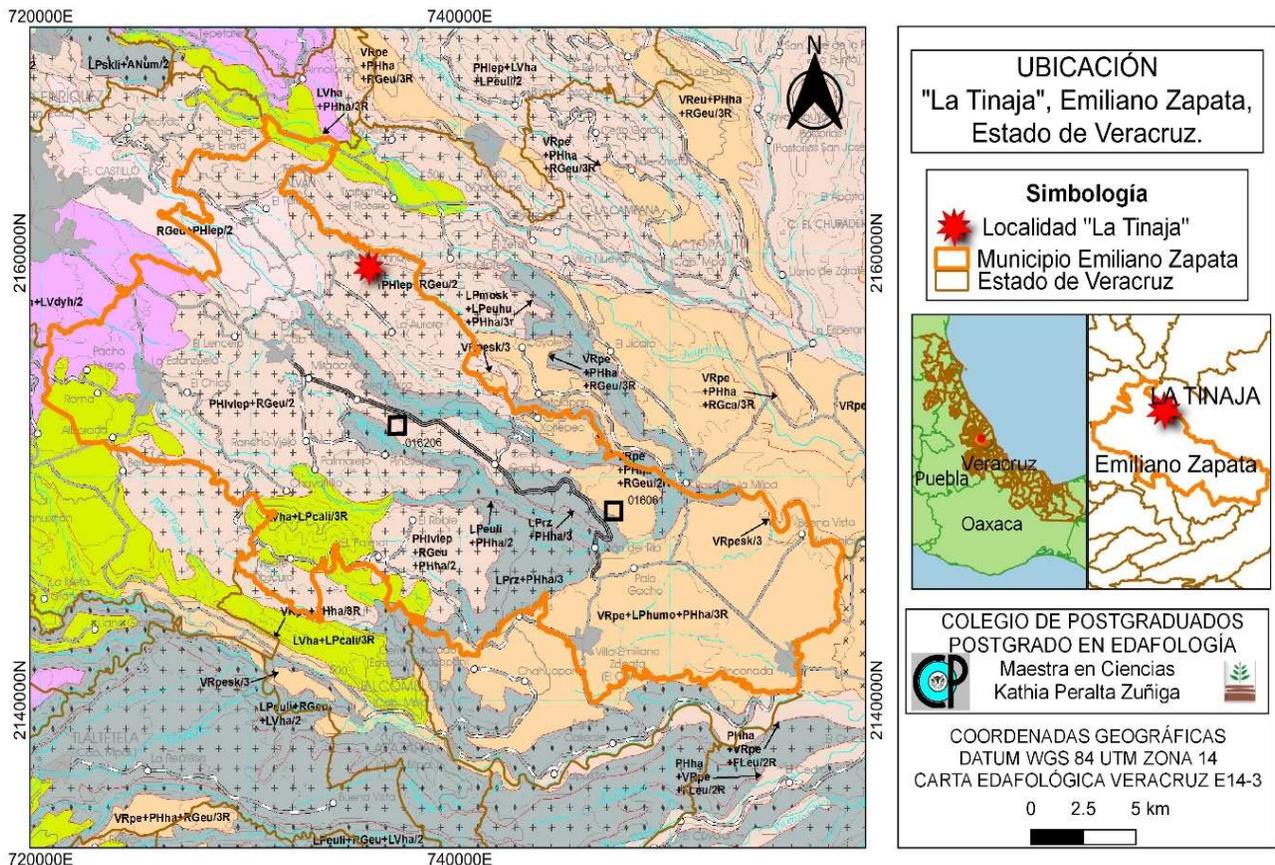


Figura 9. Ubicación del área de estudio. Localidad La Tinaja, municipio de Emiliano Zapata. Veracruz.

### 5.1.2. Variables experimentales

Los sistemas agrícolas que se evaluaron fueron sistemas tradicionales de policultivo, café con árboles de mango (*Mangifera indica*), café con plantas de plátano (*Musa paradisiaca*) y café a pleno sol. Las plantas de café que se registran en los tres sistemas de producción son café arábica variedades Costa Rica y Catimor, ambas plantas tienen edad aproximada de 30 años. El manejo agrícola consistió en la fertilización de los sistemas café-pleno sol y café-plátano con dosis de 500 kg N ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. En el sistema café-mango se fertilizó con 400 kg N ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>.

### 5.1.3. Variables de respuesta medidas

En el Cuadro 4 se muestran las variables de respuesta que se evaluaron en los sitios representativos de tres sistemas de producción de café. Los detalles metodológicos se incluyeron en el Anexo 1.

Cuadro 4. Metodología en campo y laboratorio.

Actividad de campo	Actividad de laboratorio
Objetivo 1. Conocer el estado nutrimental de las hojas en cultivos de café en tres sistemas de producción de café.	
Colecta de material vegetal	Análisis realizados a las muestras de tejido vegetal Análisis de C y N total (analizador automatizado Flash 2000 Thermo Scientific) Concentración de micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn), y Macronutrientes (Ca, Mg, K y Na), digestión húmeda con mezcla $\text{HClO}_4$ - $\text{HNO}_3$ y medición por espectrometría de absorción atómica. P total en las hojas
Objetivo 2. Evaluar la dinámica de carbono y nitrógeno, tanto hojarasca como horizonte de fermentación, en tres sistemas de producción de café.	
Colecta de muestras de hojarasca y horizonte de fermentación	Análisis químico Determinación de la concentración de C y N total, por el método de combustión seca (analizador automatizado Flash 2000 Thermo Scientific)
Objetivo 3. Hacer un diagnóstico de la fertilidad del suelo mediante indicadores químicos, evaluar emisiones de GEI del suelo y la dinámica de carbono y nitrógeno en tres sistemas de producción de café.	
Colecta de muestras de suelo.	Análisis realizados en las muestras de suelo pH (agua relación 1:2) técnica de potenciometría. Materia orgánica del suelo, Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1996) Concentración de micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) y macronutrientes (Ca, Mg, K y Na), extracción con $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 N y medición por espectrometría de absorción atómica P extraíble, método Bray y Kurtz II Concentración de C y N total, (analizador automatizado Flash 2000 Thermo Scientific) Determinación de $\text{NO}_3^-$ y $\text{NH}_4^+$ mediante extracción con cloruro de potasio (KCl) y destilación por arrastre de vapor (Bremner, 1965).
Establecimiento de cámara estática cerrada <i>in situ</i>	Medición de las emisiones de $\text{CO}_2$ y $\text{N}_2\text{O}$ del suelo Determinación de la concentración de $\text{CO}_2$ y $\text{N}_2\text{O}$ en muestras de gases mediante cromatografía de gases (cromatógrafo de gases Greenhouse Gas Analyzer Shimatzu modelo GC2014)
Objetivo 4. Estimar los efectos ambientales y huella de carbono de la producción agrícola en tres sistemas de producción de café, a través del ACV.	
Recopilación de información referente al manejo histórico de los sistemas de producción.	Uso del Programa openLCA 1.10.3

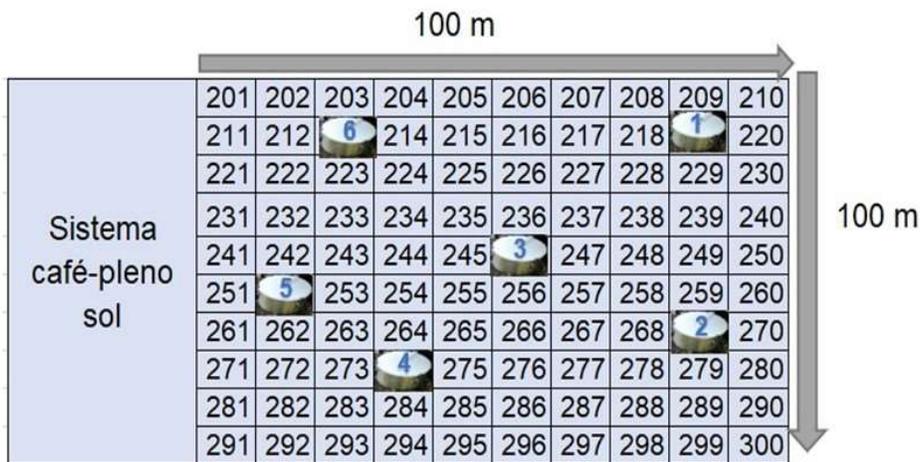
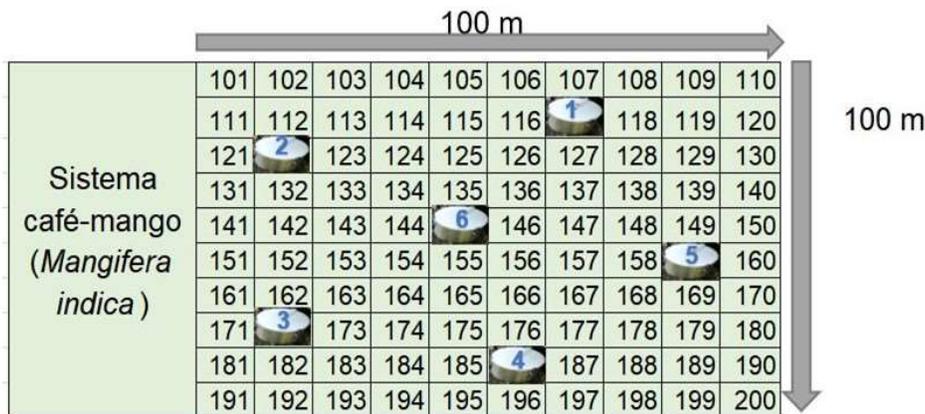
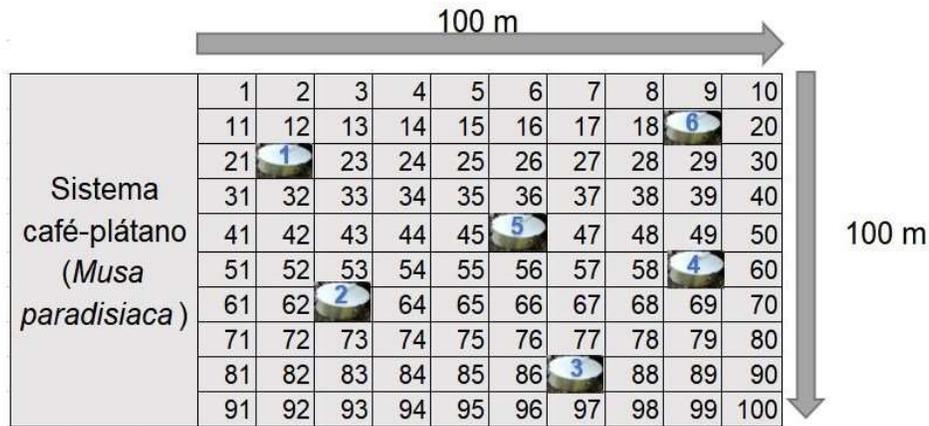
#### 5.1.4. *Diseño experimental*

En un área experimental de 3 hectáreas se seleccionaron tres parcelas de aproximadamente 1 ha cada una, representativas de los tres sistemas de producción de café de interés, dos bajo sombra: café intercalado con árboles de mango (*Mangifera indica*) y café intercalado con plantas de plátano (*Musa paradisiaca*) y un sistema de producción de café a pleno sol.

En los tres sistemas de producción se recolectaron muestras de suelo, hojarasca, horizonte de fermentación y gases (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O). Para ello el terreno correspondiente a cada sistema se dividió en cuadrantes de 100 m<sup>2</sup> (Figura 10) y estos se aleatorizaron, para establecer los puntos de muestreo. Las muestras de suelo, horizonte de fermentación, hojarasca y de gases se tomaron en el mismo punto de muestreo en cada cuadrante (Figura 10). El número y colocación de las cámaras que se utilizaron para la medición de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, así como el número de muestras de suelo, horizonte de fermentación y hojarasca que se colectaron se determinó de acuerdo con la variabilidad espacial y temporal que se observó en investigaciones previas en otros cultivos de granos básicos en México (Dendooven et al., 2012, 2014). En cada sistema de producción se colocaron seis cámaras. En total en el área experimental se colocaron 18 cámaras y se tomaron 18 muestras de hojarasca, 18 muestras de horizonte de fermentación y 18 muestras de suelo (muestras simples).

#### 5.1.5. *Recolección de muestras foliares*

La recolección de las muestras de material vegetal se realizó en los árboles de café inmediatos al punto donde se colocaron las cámaras. El muestreo foliar se hizo de acuerdo con la técnica descrita por Snoeck & Lambot (2004). Se seleccionaron 10 plantas de café y de las ramas productivas de la parte media de la planta ubicadas en los cuatro puntos cardinales se colectó el tercer o cuarto par de hojas del ápice hacia la base. Los requisitos para la selección de las hojas muestreadas fue que presentaran aspecto sano, sin efectos visibles de ataque de plagas o enfermedades (Figura 11).



Colocación de la cámara en el suelo. El número corresponde al orden en que se tomaron las muestras de hojarasca, horizonte de fermentación, suelo y gases.

Figura 10. Muestreo experimental. Los sistemas agrícolas café-plátano, café-mango y café-pleno sol tienen una hectárea de superficie y se hicieron 100 cuadros de 10 m x 10 m. Las muestras de suelo, horizonte de fermentación, hojarasca y de gases se tomaron en los cuadrantes donde se observa la cámara de acero inoxidable.

La muestra simple comprendió ocho hojas (cuatro pares de hojas por planta de café) y la muestra compuesta se formó con 80 hojas (10 árboles) en cada uno de los sistemas de producción de café (Amador Atlahua, 2019; Audate, 2016; Rivera, 1988). En total en cada sistema de producción se muestrearon 40 árboles, obteniendo cuatro muestras compuestas por cada sistema de producción. Después de la recolección, las hojas se colocaron en bolsas de papel y se transportaron al laboratorio para su posterior análisis.



Figura 11. Colecta de muestras foliares.

#### *5.1.6. Recolección de muestras de hojarasca y horizonte de fermentación*

La recolección de las muestras de hojarasca (Figura 12) y horizonte de fermentación (Figura 13) se realizaron a un costado de cada cámara. Se separó el material de la capa de hojarasca y del horizonte de fermentación presente en un área de muestreo de 900 cm<sup>2</sup>. Las muestras se transportaron al laboratorio en bolsas de papel.



Figura 12. Colecta de muestras de hojarasca del sistema café-mango.



Figura 13. Colecta de muestras de horizonte de fermentación del sistema café-mango.

#### *5.1.7. Recolección de muestras de suelo*

Las muestras de suelo se recolectaron a un costado de cada cámara en el mismo punto donde se habían obtenido las muestras de hojarasca y horizonte de fermentación. La colecta de las muestras de suelo se realizó con una barrena de 2.5 cm de diámetro a una profundidad de 15 cm (Figura 14) y se depositaron en bolsas de plástico. En cada sistema de producción se tomaron seis muestras de suelo.



Figura 14. Colecta de las muestras de suelo.

#### 5.1.8. Colecta de las muestras de GEI del suelo

La medición de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de N<sub>2</sub>O se realizó *in situ*, por la técnica de la cámara cerrada estática permanente (Mogge et al., 1999). El fundamento de esta técnica se basa en recolectar las muestras de gas del interior de las cámaras, cuatro veces en intervalos de 10 min (Figura 15). Para ello se establecieron cámaras de acero inoxidable de 25 cm de altura, diámetro interior de 15.2 cm y tapas dotadas de un tapón de goma (Figura 16). Las cámaras estáticas (Mogge et al., 1999) se colocaron a una profundidad de aproximadamente 15 cm del suelo.



Figura 15. Recolección de las muestras de gas del interior de las cámaras, cuatro veces en intervalos de 10 minutos.

Las muestras de gas de cada cámara se tomaron con una jeringa de 20 mL y se almacenaron en viales de vidrio con diámetro de 20 mm y 14 mL de capacidad y se sellaron con un tapón de goma. Previo a la colecta de las muestras, se colocó una aguja hipodérmica (0.40 mm x 13 mm) en el septo del vial (aguja de venteo) (Figura 16).

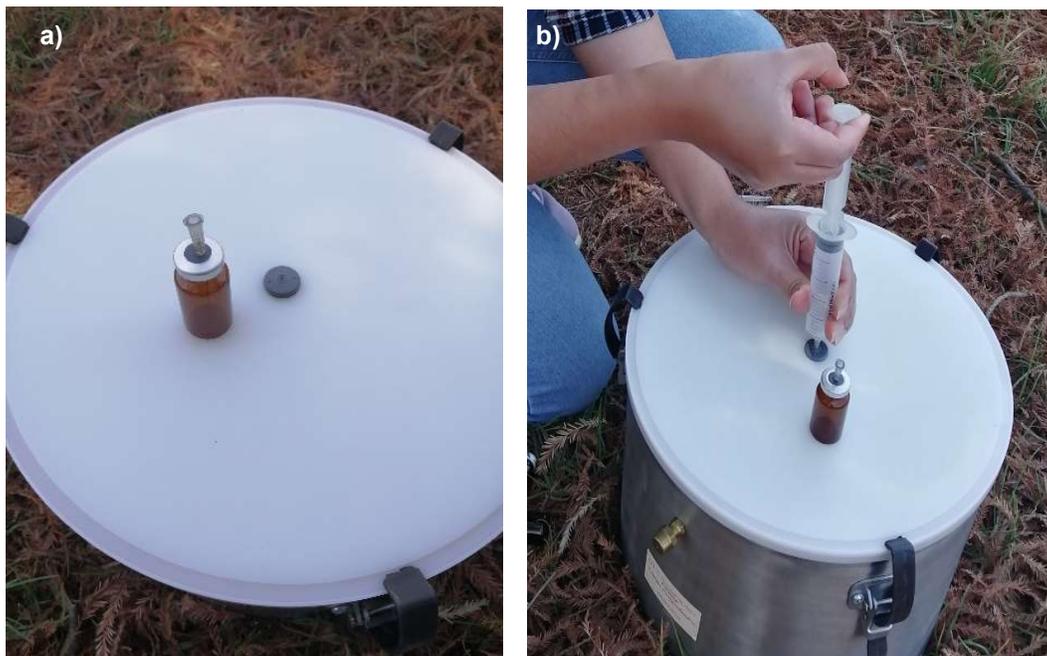


Figura 16. Desplazamiento del aire del vial. a) Vial con aguja de venteo para permitir la evacuación del aire del interior del vial. b) Inserción de la aguja de 20 ml para mezclar el aire de la cámara mediante el bombeo (succión e inyección del aire del interior de la cámara con la jeringa).

Posteriormente, la aguja de la jeringa de 20 mL se insertó en el tapón de goma de la tapa de la cámara y el aire de su interior se mezcló mediante la succión e inyección de aire tres veces sin sacar la jeringa. Una vez que el aire del interior de la cámara se mezcló, una muestra de gas se tomó de la cámara y se inyectó en el vial de vidrio, sin remover la aguja de venteo (Figura 17). Esto se realizó con el fin de desplazar el aire del interior del vial. Para la toma de muestras, se realizó el procedimiento anterior y al momento de colocar la muestra de gas en el vial de vidrio, la aguja de venteo se retiró (Figura 17). Las colectas de gas se realizaron cuatro veces cada 10 min en cada cámara.



Figura 17. Toma de muestra. a) Inyección del aire de la cámara al vial. El vial tiene insertado la aguja de venteo para permitir la salida del aire de su interior (y que no corresponde a la muestra); b) Inyección de la muestra (aire del interior de la cámara) en el vial. Al inyectar la muestra ya se debe haber quitado la aguja de venteo del vial.

La temperatura del suelo se midió con sensores digitales (HOBO), los cuales se colocaron en el interior de cada cámara al inicio del muestreo y se removieron al final del muestreo (Figura 18).



Figura 18. Colocación del sensor digital en el interior de cada cámara para medir la temperatura del suelo.

Al concluir la toma de muestras de gases, se hizo una medición de la altura de cada cámara (Figura 19) en tres puntos al interior de la misma con la finalidad de conocer el volumen de ésta.



Figura 19. Medición de las alturas en cada cámara.

El flujo de gas emitido se calculó como la pendiente de la relación entre el tiempo (intervalo de medición de 40 minutos) y la concentración del gas ( $\text{mg L}^{-1}$ ) obtenida mediante cromatografía de gases.

#### *5.1.9. Análisis del ciclo de vida*

Para el ACV de la producción de café, se siguió la metodología descrita en la sección 2.9 de Revisión de literatura. Los límites que se definieron en los tres sistemas de producción de café fueron las etapas de establecimiento de la plantación (desarrollo de la planta, año 1-3) y manejo agrícola (producción y cosecha) (Figura 20). La UF que se definió fue 1 kg de café cereza fresca no procesada.

El inventario se completó con la información que se recopiló de entrevistas con el productor. Las variedades de café registradas en los tres sistemas de producción son café arábica variedades Costa Rica y Catimor. La adquisición de la planta de café fue donada por apoyos de SADER o el municipio. Ambas variedades tienen una edad aproximada de 30 años.



Figura 20. Límites del ACV en los sistemas de producción de café-mango, café-plátano y café-pleno sol y coproductos que se generan en los sistemas de producción de café (Sevenster & Verhagen, 2010).

El rendimiento de café-mango, café-plátano y café-pleno sol fue de 3.0, 1.8 y 1.5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente (Datos no publicados). El rendimiento en el cultivo de plátano fue de 800 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y se vendió a \$ 6 kilo. El rendimiento en el cultivo de mango fue de 600 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y se vendió a \$10 kilo.

En el Cuadro 5 se muestran las actividades agronómicas y los insumos agrícolas de los tres sistemas de producción de café. El productor reportó tener un trabajador de confianza para realizar las actividades agronómicas. Se contrató personal en las actividades de apertura de hoyos para sembrar las plantas de café, así como en la cosecha.

La información del inventario se agrupó en categorías de impacto ambiental, para ello se usaron las categorías ambientales del método CML Baseline 2015 que incluye: 1. Acidificación potencial (AP), 2. Cambio climático global (CC), 3. Agotamiento de los recursos abióticos: elementos y últimas reservas (AA), 4. Agotamiento de los recursos abióticos: combustibles fósiles (AAF), 5. Eutrofización (E), 6. Ecotoxicidad acuática de agua dulce (ED), 7. Toxicidad humana (TH), 8. Ecotoxicidad acuática marina (EM), 9. Agotamiento de la capa de ozono (AO), 10. Oxidación fotoquímica (OF) y 11. Ecotoxicidad terrestre (ET).

Cuadro 5. Inventario del manejo agrícola de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

Manejo agrícola en los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol				
Establecimiento de la Plantación (Año 1-3)				
Operación en campo	Actividad	Insumo	Unidad	Cantidad
Preparación del terreno	Chapeo		Jornal	1
	Apertura de hoyos	Hoyos para la planta	Jornal	1
Abonado de fondo	Nitrofoska	Fertilizante	kg/ha	50
	Sulfato de amonio	Fertilizante	kg/ha	50
Plantación	Establecimiento de planta		Jornal	1
Desarrollo de la Planta				
Fertilización	Sulfato de amonio	Fertilizante	kg/ha	150
	Nitrofoska	Fertilizante	kg/ha	50
Control de malezas	Manual	Deshierbes	Jornal	1
	Herbicida (takle)	Herbicida	L/ha	5
Control de plagas	Aplicación		Jornal	1
	Trampas con alcohol	Trampas	trampas/ha	18
Manejo agrícola				
Producción y cosecha en el sistema café-pleno sol				
Fertilización	NPK 18-12-6	Fertilizante	kg/ha	500
Control de malezas	Manual	Deshierbes	Jornal	1
	Química (takle)	Herbicida	L/ha	5
Control de plagas	Manual	Trampa con alcohol	trampas/ha	18
Cosecha	Corte		Jornal	7
	Caballo		caballo	2
Producción y cosecha en el sistema café-plátano				
Fertilización	NPK 18-12-6	Fertilizante	kg/ha	400
Control de malezas	Manual	Deshierbes	Jornal	1
	Química (takle)	Herbicida	L/ha	5
Control de plagas	Manual	Trampa con alcohol	trampas/ha	18
Cosecha	Corte		Jornal	7
	Caballo		caballo	2
Labores culturales en la planta de plátano				
Fertilización	Urea	Fertilizante	kg/ha	100
Control de plagas	Tamaron	Insecticida	L/ha	1
Producción y cosecha en el sistema café-mango				
Fertilización	NPK 18-12-6	Fertilizante	kg/ha	400
Control de malezas	Manual	Deshierbes	Jornal	1
	Química (takle)	Herbicida	L/ha	5
Control de plagas	Manual	Trampa con alcohol	trampas/ha	18
Cosecha	Corte		Jornal	7
	Caballo		caballo	2

En el Cuadro 6 se observan los costos de las actividades agronómicas de los sistemas café-mango, café-plátano y café-pleno sol.

Cuadro 6. Costos durante la etapa de producción en los sistemas de café-mango, café-plátano y café-pleno sol.

COSTOS					
Establecimiento de la Plantación (Año 1-3)					
Operación en campo	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)
Preparación del terreno	Chapeo	1	180	15	2700
	Apertura de hoyos	1	180	15	2700
Plantación	Establecimiento de planta	1	180	4	720
				Bultos (50 kg)	
Abonado de fondo	Actividad	Precio/ kg	Unidad	kg)	Total (\$)
	Nitrofoska	720	\$/kg	1	720
	Sulfato de amonio	260	\$/kg	1	260
Desarrollo de la Planta					
Operación en campo	Actividad	Precio/kg	Unidad	Bultos (50 kg)	Total (\$)
Fertilización	Nitrofoska	720	\$/ kg	1	720
	Sulfato de amonio	260	\$/ kg	3	780
Control de malezas	Actividad	Jornalero	precio/día	Días trabajados	Total (\$)
	Manual (Deshierbes)	1	180	12	2160
	Actividad	Precio / litro	Unidad	Litros usados	Total
	Herbicida (Takle)	138	\$/ L	5	690
Manejo agrícola					
Producción y cosecha café-pleno sol					
Operación en campo	Actividad	Precio / kg	Unidad	Bultos (50 kg)	Total (\$)
Fertilización	NPK 18-12-6	320	\$/kg	10	3200
Operación en campo	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)
	Manual (Deshierbes)	1	180	15	2700
	Aplicación de herbicida	1	180	12	2160
Control de malezas	Actividad	Precio / litro	Unidad	Litros usados	Total (\$)
	Herbicida (Takle)	138	\$/ L	5	690
Podas	Insumos	Precio unitario		Cantidad	Total (\$)
	Limas	30		3	90
	Machetes	55		3	165
	Bomba de mochila	1200		1	1200
	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)
	Se tira la mata (6 matas por ha)	1	180	12	2160
Cosecha	Actividad	Jornalero	Precio/kilo	trabajados	Total (\$)
	Corte	8	2.5	120	2400
Transporte	Transporte	\$/día	unidad	días	Total (\$)

		Camioneta	100	1	120	12000
<b>Producción y cosecha café-plátano</b>						
Operación en campo	Actividad	Precio / kg	Unidad	Bultos (50 kg)	Total (\$)	
Fertilización	NPK 18-12-6	320	\$/kg	8	2560	
	Urea (plantas de plátano)	240	\$/kg	2	480	
Operación en campo	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)	
	Manual (Deshierbes)	1	180	15	2700	
	Aplicación de herbicida	1	180	12	2160	
Control de malezas	Actividad	Precio / litro	Unidad	Litros usados	Total (\$)	
	Herbicida (Takle)	138	\$/L	5	690	
	Insumos	Precio unitario		Cantidad	Total (\$)	
	Limas	30		3	90	
	Machetes	55		3	165	
	Bomba de mochila	1200		1	1200	
Control de plagas	Actividad	Precio / litro	Unidad	Litros usados	Total (\$)	
	Tamaron (insecticida)	220	\$/L	1	220	
Podas	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)	
	Se tira la mata (6 matas por ha)	1	180	12	2160	
Cosecha	Actividad	Jornalero	Precio/kilo	Días trabajados	Total (\$)	
	Corte	8	2.5	120	2400	
Transporte	Transporte Camioneta	\$/día	unidad	días	Total (\$)	
		100	1	120	12000	
<b>Producción y cosecha café-mango</b>						
Operación en campo	Actividad	Precio / kg	Unidad	Bultos (50 kg)	Total (\$)	
Fertilización	NPK 18-12-6	320	\$/kg	8	2560	
Operación en campo	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)	
	Manual (Deshierbes)	1	180	15	2700	
	Aplicación de herbicida	1	180	12	2160	
Control de malezas	Actividad	Precio / litro	Unidad	Litros usados	Total (\$)	
	Herbicida (Takle)	138	\$/L	5	690	
	Insumos	Precio unitario		Cantidad	Total (\$)	
	Limas	30		3	90	
	Machetes	55		3	165	
	Bomba de mochila	1200		1	1200	
Podas	Actividad	Jornalero	Precio/día	Días trabajados	Total (\$)	
	Se tira la mata (6 matas por ha)	1	180	12	2160	
Cosecha	Actividad	Jornalero	Precio/kilo	Días trabajados	Total (\$)	
	Corte	8	2.5	120	2400	
Transporte	Transporte Camioneta	\$/día	unidad	días	Total (\$)	
		100	1	120	12000	

Una vez que la información del inventario se agrupó en las categorías ambientales, esta información se transformó en indicadores de impacto ambiental a través de factores de conversión o caracterización.

Para conocer el impacto ambiental de los tres sistemas de producción de café, se usó el programa OpenLCA 1.10, método CML Baseline 2015 y la base de datos Ecoinvent 3.2. En el software se introdujo la información agronómica (Cuadro 5) por cada sistema de producción de café. En la categoría de cambio climático global, se usaron los datos obtenidos en campo de las emisiones CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O de cada uno de los sistemas de producción de café. Estos datos sirvieron para calibrar el modelo en la categoría de cambio climático global. En las demás categorías ambientales se usó la base de datos Ecoinvent 3.2.

## **5.2. Fase de laboratorio**

### *5.2.1. Análisis en tejido vegetal*

La determinación de N y C total se realizó mediante combustión seca con un automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific). La cuantificación de macro y micronutrientes se realizó en un digerido hecho con una mezcla de HClO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub> (1:2). La concentración de P se midió espectrofotométricamente haciendo reaccionar el P solubilizado con vanadomolibdato de amonio. Las concentraciones macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) se midieron por espectroscopia de absorción atómica. Los detalles metodológicos se muestran en el Anexo 1.

### *5.2.2. Análisis en hojarasca y horizonte de fermentación*

La determinación de C y N total se hizo mediante combustión seca empleando un analizador automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific). Los detalles metodológicos se muestran en el Anexo 1.

### *5.2.3. Análisis en suelos*

La determinación de pH se realizó potenciométricamente en una suspensión de suelo en agua (1:2). La concentración de materia orgánica se determinó con el método Walkley-

Black (Nelson & Sommers, 1996). La cuantificación de micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) y macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) se hizo por espectroscopía de absorción atómica, en el primer caso en un extracto hecho con DTPA y en el segundo con  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  pH 7 1 N. Para la determinación de fósforo extraíble se usó el método Bray y Kurtz II. La concentración de C y N total se midió mediante combustión seca con un analizador automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific). La solubilización de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  se hizo con una solución de (KCl 2 N y la destilación se realizó por arrastre de vapor (Bremner, 1965). Los detalles metodológicos se muestran en el Anexo 1.

#### *5.2.4. Análisis de GEI*

La cuantificación de  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ , se realizó por cromatografía de gases, con un aparato marca Shimadzu (Modelo GC2014 Greenhouse gas Analyzer).

### **5.3. Análisis estadístico**

Los datos se analizaron con el Programa SAS (The SAS system, 2011). Los datos se sometieron a las pruebas estadísticas de Barlett y Shapiro Wilk para verificar la homogeneidad de varianzas y la normalidad de los datos. Posterior a estas pruebas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y se usó la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) para conocer si existían diferencias significativas entre los sistemas de producción. Los datos de las variables que no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se transformaron con raíz cuadrada y logarítmica. Y también se usó estadística no paramétrica a través de la prueba de Kruskal-Wallis, para conocer si existían diferencias significativas entre los sistemas de producción (sólo en la variable de K foliar). Se realizaron análisis de correlación de Pearson entre las variables de tejido foliar, hojarasca, horizonte de fermentación y suelo entre los diferentes sistemas de producción.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Tejido vegetal

#### 6.1.1. Concentración de C y nutrientes

En el Cuadro 7 se presentan las características químicas de las hojas del cultivo de café de los sistemas que se estudiaron. El porcentaje foliar de C fue 4.5 y 4.0 % mayor en los sistemas café-pleno sol y café-plátano, respectivamente (entre los cuales no hubo diferencias significativas) en comparación con el sistema café-mango ( $p=0.007$ ;  $F=8.7$ ). La concentración foliar de N de la asociación café-mango fue 20 y 29 % mayor que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente ( $p=0.001$ ;  $F=14.0$ ) entre los cuales tampoco hubo diferencias significativas. La relación C:N de las hojas de café del sistema café-mango fue 31 y 24 % menor en comparación con la determinada en las hojas del cultivo de café de los sistemas café-pleno sol y café-plátano, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F=18.6$ ). Estos dos últimos sistemas fueron estadísticamente iguales. La concentración foliar de Zn fue 20 y 24 % significativamente mayor ( $p<0.001$ ;  $F=41.3$ ) en la asociación café-pleno sol que en la correspondiente a los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente, entre los cuales no hubo diferencias significativas. No se observaron diferencias significativas en la concentración foliar de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn en el cultivo de café de los sistemas que se analizaron.

Cuadro 7. Características químicas en las hojas del cultivo de café de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

Variable	Café-plátano	Café-mango	Café-pleno sol
Carbono (%)	48.7 ± 0.26 a	46.8 ± 0.60 b	49.0 ± 0.27 a
Nitrógeno (%)	2.6 ± 0.19 b	3.3 ± 0.02 a	2.4 ± 0.06 b
Fósforo (%)	0.13 ± 0.02 a	0.11 ± 0.01 a	0.12 ± 0.00 a
Potasio (%)	2.3 ± 0.03 a	2.9 ± 0.15 a	2.0 ± 0.01 a
Calcio (%)	1.4 ± 0.11 a	1.7 ± 0.08 a	1.4 ± 0.03 a
Magnesio (%)	0.4 ± 0.01 a	0.4 ± 0.04 a	0.5 ± 0.01 a
Sodio (%)	0.01 ± 0.00 a	0.01 ± 0.00 a	0.01 ± 0.00 a
Hierro (mg kg <sup>-1</sup> )	69.0 ± 2.53 a	75.9 ± 2.32 a	70.1 ± 5.21 a
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	7.1 ± 0.81 a	10.2 ± 0.64 a	8.4 ± 1.03 a
Zinc (mg kg <sup>-1</sup> )	10.2 ± 0.30 b	10.7 ± 0.30 b	13.4 ± 0.20 a
Manganeso (mg kg <sup>-1</sup> )	275.1 ± 35.3 a	220.8 ± 21.2 a	203.4 ± 14.2 a
Relación C:N	18.7 ± 1.42 a	14.2 ± 0.25 b	20.7 ± 0.48 a

Los valores corresponden al promedio y error estándar,  $n=4$ . Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ) entre sistemas para una misma variable.

## 6.2. Hojarasca y horizonte de fermentación

### 6.2.1. Concentración de C en hojarasca y horizonte de fermentación

La concentración de C en la hojarasca de los sistemas analizados fue estadísticamente igual en los tres sistemas de estudio (Figura 21a). Mientras que en el horizonte de fermentación (Figura 21b), la concentración de C del sistema café-pleno sol fue 37 y 34 % menor que en los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente ( $p=0.001$ ;  $F=11.1$ ). En estos dos últimos, la concentración de C resultó ser estadísticamente igual entre sí.

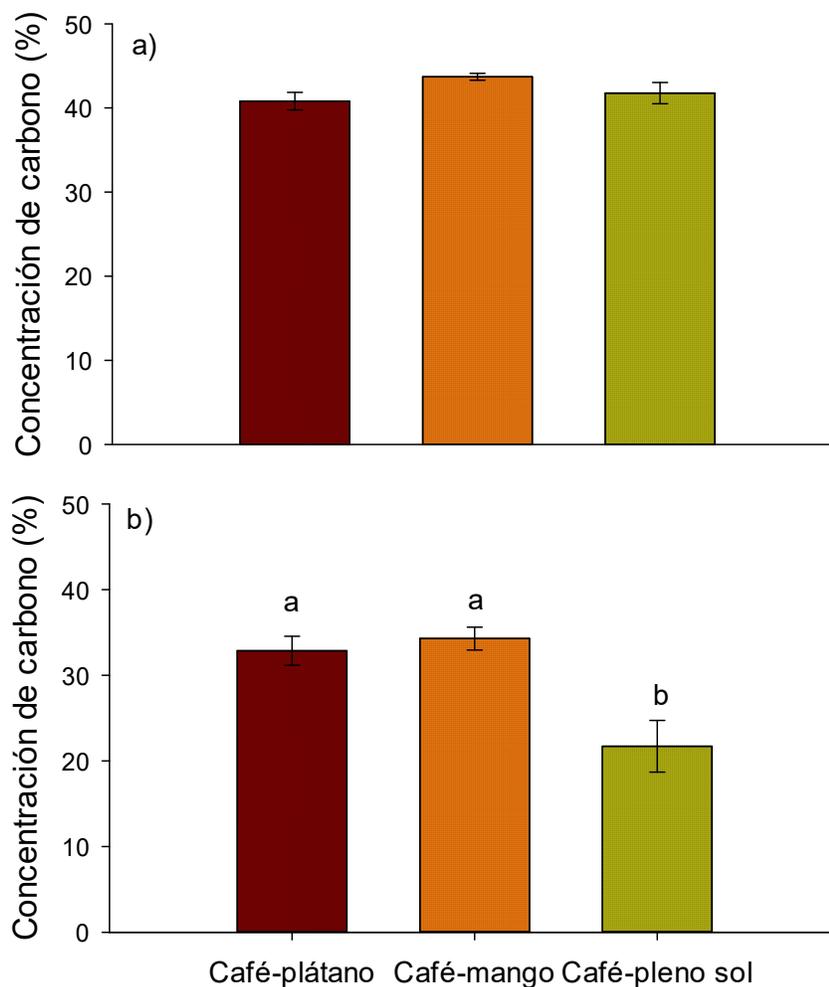


Figura 21. Concentración de carbono en la hojarasca (a) y el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

### 6.2.2. Concentración de N en hojarasca y horizonte de fermentación

La concentración de N en la hojarasca (Figura 22a) del sistema café-pleno sol fue significativamente menor (29 %) en comparación con la correspondiente de la hojarasca del sistema café-plátano ( $p=0.004$ ;  $F=8.1$ ). Similarmente, la concentración de N en el horizonte de fermentación (Figura 22b) del sistema café-pleno sol fue 40 y 30 % menor que en el horizonte de fermentación de los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F=18.6$ ). Entre estos dos últimos sistemas la concentración de N no mostró diferencias significativas.

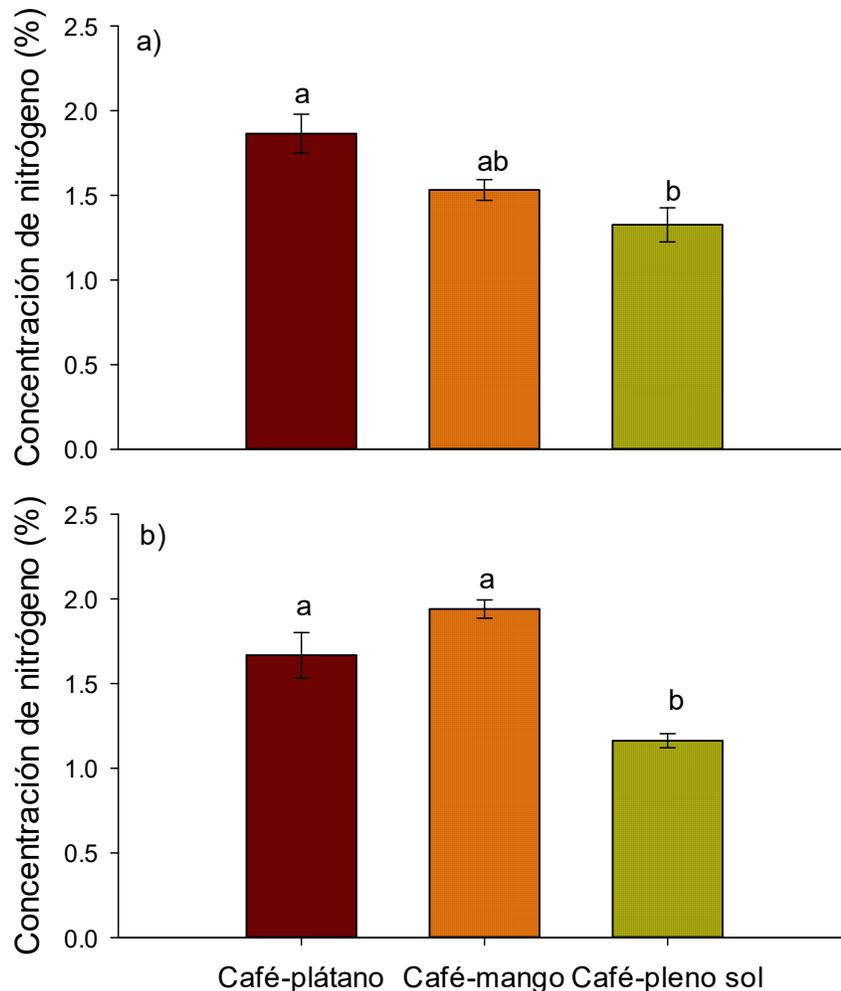


Figura 22. Concentración de nitrógeno en la hojarasca (a) y en el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

La relación C:N de la hojarasca del sistema café-plátano fue significativamente menor (31 %) que la del sistema café-pleno sol ( $p=0.01$ ;  $F=5.7$ ) (Figura 23a), pero en el horizonte de fermentación, la relación C:N no fue diferente entre los sistemas de análisis (Figura 23b).

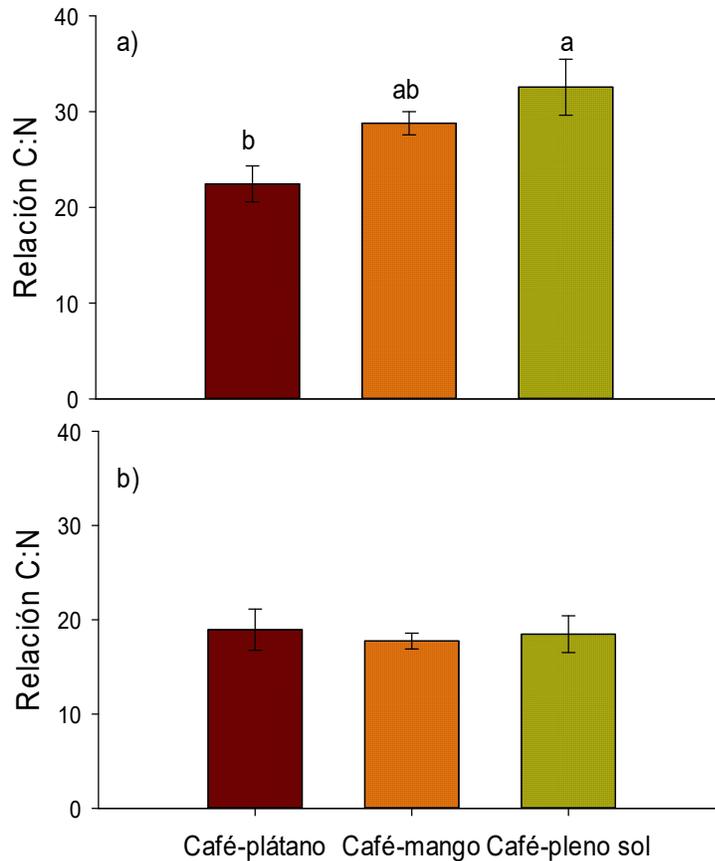


Figura 23. Relación C:N en la hojarasca (a) y en el horizonte de fermentación (b) de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

### 6.3. Suelo

#### 6.3.1. Propiedades químicas

Las propiedades químicas de los suelos de estudio se muestran en el Cuadro 8. El pH del suelo del sistema café-pleno sol fue significativamente menor (13 y 14 %) en comparación con los sistemas café-plátano y café-mango, respectivamente ( $p= 0.004$ ;  $F= 8.2$ ), pero estos dos últimos tuvieron el mismo pH (5.7).

El porcentaje de MOS en el sistema café-mango fue 34 y 47 % mayor que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente ( $p=0.001$ ;  $F=11.0$ ), entre los cuales no hubo diferencias significativas.

Algo semejante a la situación de la MOS ocurrió con la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el suelo del sistema café-mango, la que fue 38 y 41 % mayor que la de los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F=14.4$ ). Entre estos dos últimos no hubo diferencias significativas. En contraste con lo ocurrido con la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , la concentración de  $\text{NH}_4^+$  de los suelos analizados no mostró diferencias significativas entre los tres sistemas.

La concentración de C en el suelo del sistema café-mango fue el doble que la medida en el sistema café-pleno sol ( $p= 0.001$ ;  $F= 10.1$ ) y la concentración de N en este sistema fue 32 y 50 % mayor que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F=16.8$ ). Entre estos dos últimos no hubo diferencias significativas. La relación C:N de los suelos estudiados de los tres sistemas experimentales no mostró diferencias significativas. En contraste, la concentración de P Bray en el sistema café-plátano fue significativamente mayor ( $p<0.001$ ;  $F=21.2$ ), que en el sistema café-pleno sol ( $p<0.001$ ;  $F=21.2$ ) y, a su vez, ésta fue significativamente mayor que la del sistema café-mango. Asimismo, la concentración de K en el suelo del sistema café-pleno sol fue 64 y 57 % menor que la determinada en los sistemas café-plátano y café-mango, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F= 13.8$ ). Entre estos dos últimos no hubo diferencias significativas en la concentración de potasio. La concentración de Ca en el sistema café-mango fue significativamente mayor ( $p<0.001$ ;  $F=26.1$ ) que la del sistema café-plátano, y que a su vez ésta fue significativamente mayor que la del sistema café-pleno sol ( $p<0.001$ ;  $F=26.1$ ).

La concentración de Na en el suelo del sistema café-plátano fue 77 y 100 % mayor que la de los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente ( $p= 0.003$ ;  $F=8.3$ ), pero estos dos últimos, la concentración no difirió significativamente entre sí. El Mg extraído del suelo en los tres sistemas analizados resultó ser estadísticamente igual.

La concentración de Zn extraído del suelo del sistema café-plátano, fue 63 y 52 % mayor que los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente ( $p= 0.008$ ;  $F=6.5$ ), entre los cuales no hubo diferencias significativas. La concentración de Mn en el suelo del sistema café-pleno sol fue 87 y 83 % menor que el medido en los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F=26.7$ ); entre los cuales resultaron ser estadísticamente iguales. No se observaron diferencias significativas en la concentración de Fe, Mg y Cu extraído de los suelos de los sistemas que se analizaron.

Cuadro 8. Propiedades químicas del suelo de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

Variable	Café-plátano	Café-mango	Café-pleno sol
pH	5.7 ± 0.2 a	5.7 ± 0.2 a	4.9 ± 0.0 b
Materia orgánica (%)	2.53 ± 0.14 b	3.80 ± 0.37 a	2.0 ± 0.25 b
Carbono (%)	1.8 ± 0.2 ab	2.4 ± 0.2 a	1.2 ± 0.2 b
Nitrógeno (%)	0.17 ± 0.01 b	0.25 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 b
Relación C:N	10.3 ± 0.62 a	9.6 ± 0.53 a	9.5 ± 0.46 a
Nitratos (mg kg <sup>-1</sup> )	17.0 ± 1.55 b	28.0 ± 1.91 a	17.0 ± 1.63 b
Amonio (mg kg <sup>-1</sup> )	15.0 ± 1.44 a	17.0 ± 1.53 a	13.0 ± 1.43 a
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	146.6 ± 31.8 a	14.0 ± 2.68 c	58.3 ± 19.7 b
Potasio (meq/100g)	1.27 ± 0.19 a	1.05 ± 0.12 a	0.46 ± 0.04 b
Calcio (meq/100g)	4.81 ± 0.87 b	7.59 ± 0.70 a	1.25 ± 0.31 c
Magnesio (meq/100g)	1.69 ± 0.44 a	1.32 ± 0.23 a	0.62 ± 0.14 a
Sodio (meq/100g)	0.05 ± 0.01 a	0.01 ± 0.01 b	0.00 ± 0.01 b
Hierro (mg kg <sup>-1</sup> )	55.4 ± 1.46 a	60.17 ± 10.9 a	55.4 ± 4.66 a
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	1.30 ± 0.25 a	0.55 ± 0.11 a	0.79 ± 0.24 a
Zinc (mg kg <sup>-1</sup> )	4.05 ± 0.73 a	1.52 ± 0.22 b	1.94 ± 0.51 b
Manganeso (mg kg <sup>-1</sup> )	26.0 ± 1.79 a	33.45 ± 7.02 a	4.46 ± 1.12 b

Los valores corresponden al promedio de  $n=6$  y error estándar. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

El porcentaje de humedad del suelo fue 28 y 30 % mayor en el suelo del sistema café-mango que el de los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F= 14.4$ ) (Figura 24). Entre estos últimos sistemas no hubo diferencias significativas.

La temperatura del suelo fue 20 y 23 % mayor en el sistema café-pleno sol, que en los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente ( $p<0.001$ ;  $F= 62.7$ ) (Figura 25), pero la temperatura entre estos dos últimos no difirió.

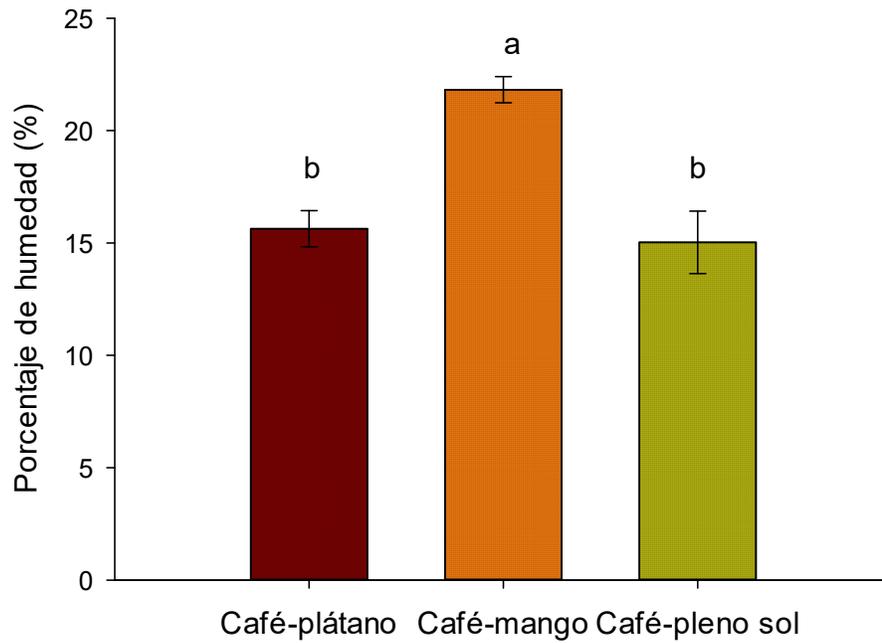


Figura 24. Porcentaje de humedad en los suelos de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

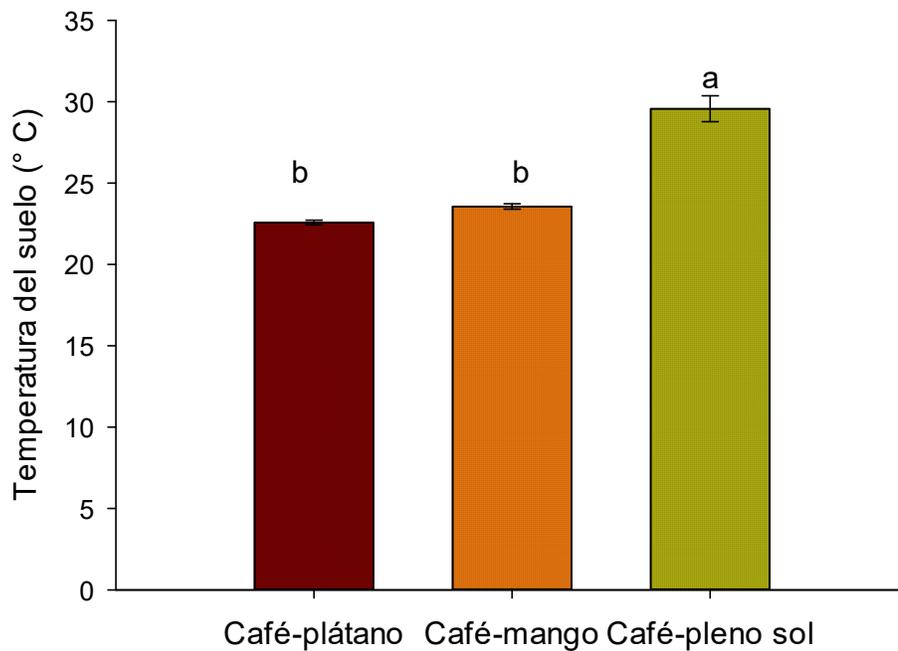


Figura 25. Temperatura del suelo en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

### 6.3.2. Emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ y $\text{N}_2\text{O}$ )

Concordante con los valores de MOS, la emisión de  $\text{CO}_2$  desde el suelo del sistema café-mango fue el doble que la del sistema café-pleno sol ( $p=0.01$ ;  $F=6.3$ ) (Figura 26).

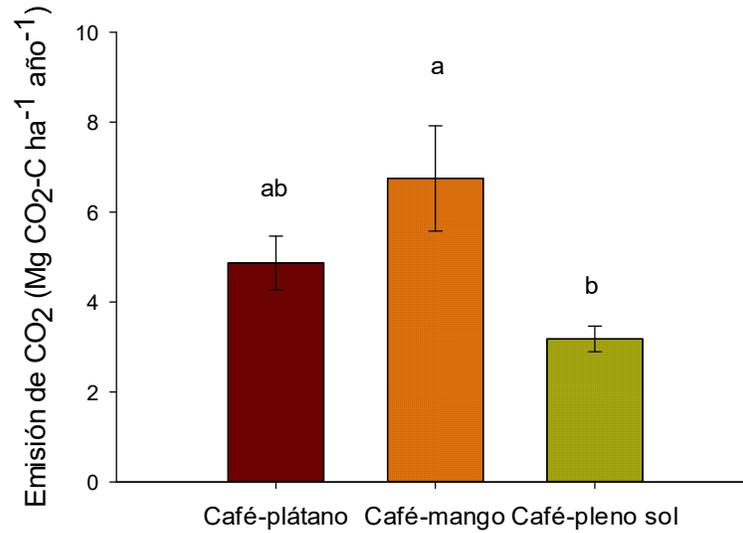


Figura 26. Emisión de  $\text{CO}_2$  de los suelos de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey,  $\alpha \leq 0.05$ ).

No se observaron diferencias significativas en las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  de los suelos analizados (Figura 27).

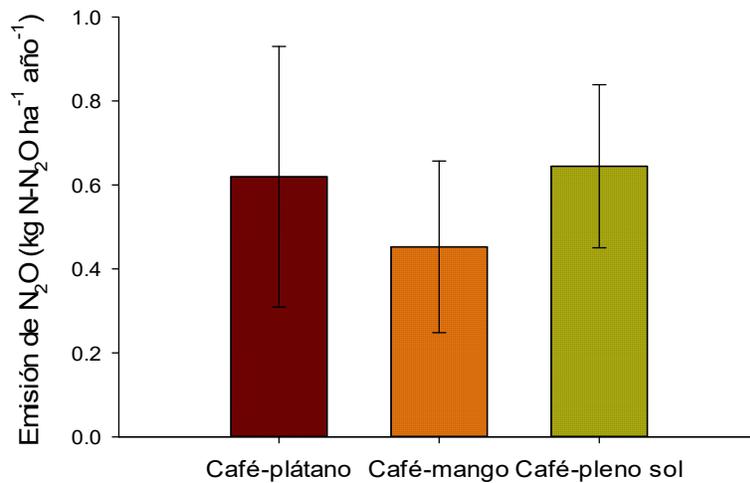


Figura 27. Emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  de los suelos de los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

#### 6.4. Análisis del ciclo de vida

Los valores de impacto ambiental de los sistemas de producción de café se presentan en el Cuadro 9. La categoría de ecotoxicidad acuática marina es la que tuvo mayor impacto ambiental en los tres sistemas de producción de café.

Cuadro 9. Valores de impactos ambiental por 1 kg de café cereza en los sistemas de producción café-plátano, café-mango y café-pleno sol

Categoría de Impacto Ambiental	Unidad de Referencia	Café-plátano	Café-mango	Café-pleno sol
Potencial de acidificación (PA)	kg SO <sub>2</sub> eq.	3.026E-03	1.084E-03	2.929E-03
Cambio climático global (CC)	kg CO <sub>2</sub> eq.	3.031E+00	2.270E+00	2.743E+00
Agotamiento de los recursos abióticos: elementos, reservas finales (AA)	kg de antimonio eq.	5.127E-06	1.991E-06	5.508E-06
Agotamiento de los recursos abióticos - combustibles fósiles (AAF)	MJ	5.849E+00	1.861E+00	4.992E+00
Eutrofización (E)	kg PO <sub>4</sub> --- eq.	1.068E-03	5.028E-04	1.383E-03
Ecotoxicidad acuática de agua dulce (ED)	kg 1,4-diclorobenceno eq.	1.917E-01	9.036E-02	2.476E-01
Toxicidad humana (TH)	kg 1,4-diclorobenceno eq.	4.199E-01	1.788E-01	4.984E-01
Ecotoxicidad acuática marina (EM)	kg 1,4-diclorobenceno eq.	5.554E+02	2.550E+02	6.999E+02
Agotamiento de la capa de ozono (AO)	kg CFC-11 eq.	4.500E-08	1.533E-08	4.100E-08
Oxidación fotoquímica (OF)	kg etileno eq.	1.213E-04	4.356E-05	1.164E-04
Ecotoxicidad terrestre (ET)	kg 1,4-diclorobenceno eq.	5.889E-03	2.143E-03	5.822E-03

Se hizo una ponderación de porcentaje por cada categoría de impacto ambiental, dónde al mayor resultado por categoría se le atribuyó 100 % y los otros resultados se ponderaron para contrastar los tres sistemas de producción (Figura 28). El sistema café-mango es el que tuvo el menor impacto ambiental en las categorías que mide el análisis del ciclo de vida.

En la Figura 29 se observan los procesos que se evaluaron en cada una de las categorías del ACV en los sistemas de análisis. El establecimiento de la plantación fue la actividad que tuvo el menor impacto en todas las categorías. El proceso que tuvo mayor impacto ambiental en las categorías PA, AA, AAF, E, ED, TH, EM, AO, OF y ET fue la manufacturación de los fertilizantes químicos (NPK y urea) en los tres sistemas de análisis. En el sistema café-plátano, la elaboración de urea y NPK fueron los principales factores que contribuyeron en casi todas las categorías que mide el análisis del ciclo de vida. En la categoría de CC, las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) provenientes del uso de los fertilizantes químicos, fue la principal fuente emisora en los tres sistemas de estudio.

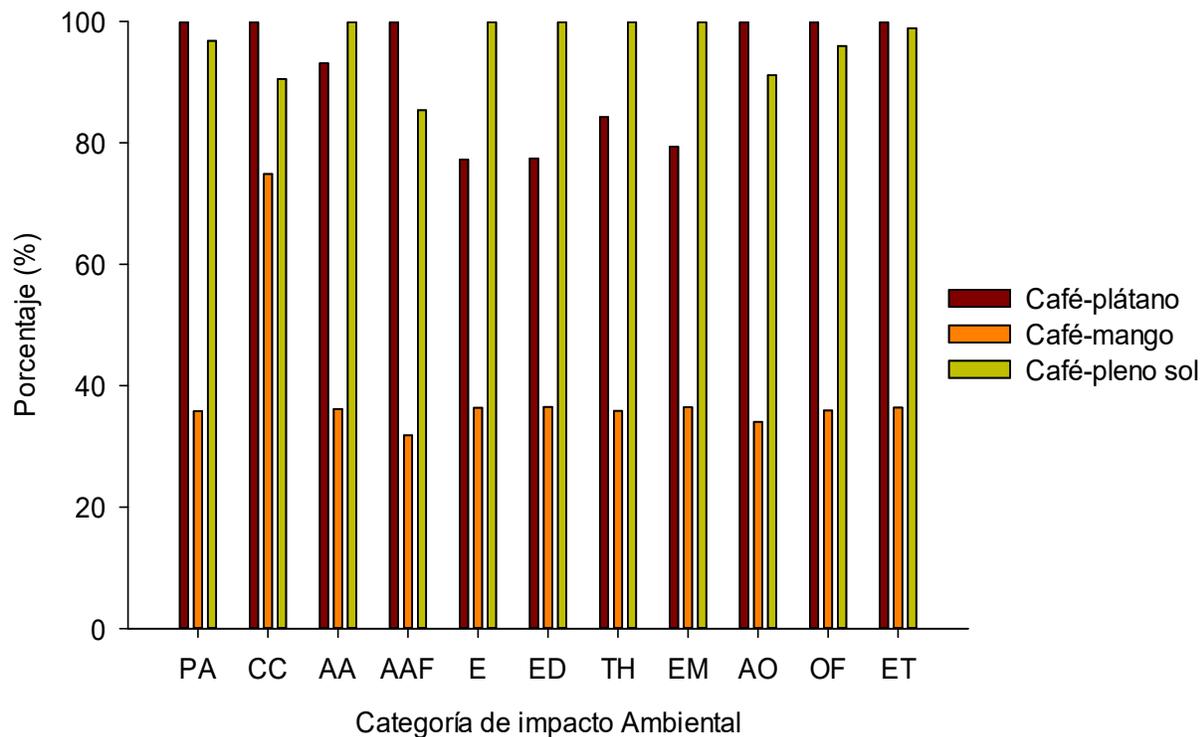


Figura 28. Impacto ambiental en los sistemas de producción café-plátano, café-mango, café-pleno sol. Dónde:

PA= Potencial de acidificación

CC= Cambio climático global

AA= Agotamiento de los recursos abióticos: elementos, reservas finales

AAF= Agotamiento de los recursos abióticos: combustibles fósiles

E= Eutrofización

ED= Ecotoxicidad acuática de agua dulce

TH= Toxicidad humana

EM= Ecotoxicidad acuática marina

AO= Agotamiento de la capa de ozono

OF= Oxidación fotoquímica

ET= Ecotoxicidad terrestre.

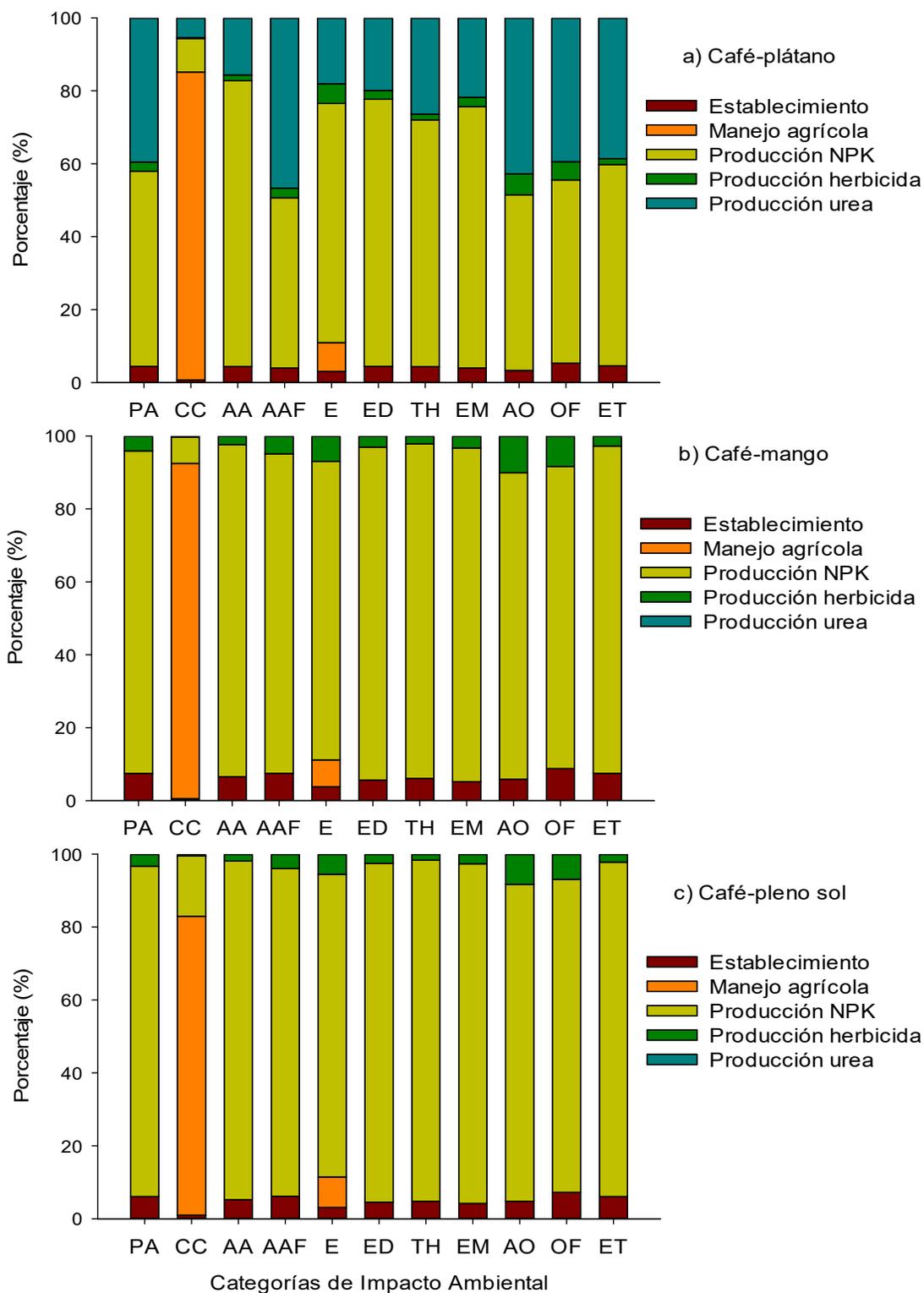


Figura 29. Procesos de la producción de café, que contribuyen a las categorías de impacto ambiental del ACV en los sistemas café-plátano (a), café-mango (b) y café-pleno sol (c).

En la categoría de PA, el principal proceso que contribuyó fue la producción de NPK en los sistemas de análisis (Figura 29); lo que representó 53.5, 88.5 y 90.6 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La producción de nitrato de amonio y sulfato de potasio que provienen de la fabricación de NPK fueron los principales procesos que afectaron esta categoría en los sistemas de estudio (Figura 30a). La producción de nitrato de amonio aportó 32.4, 54 y 55 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La elaboración de sulfato de potasio contribuyó 15.2, 25.4 y 25.8 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. En el sistema café-plátano la producción de urea representó 39.6 % a esta categoría (Figura 30a).

Las emisiones de GEI, provenientes del uso de los fertilizantes químicos, fue la principal causa que influyó en la categoría de CC en los sistemas estudiados (Figura 29). Estas emisiones aportaron 84.5, 91.9 y 82 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La fabricación de los fertilizantes NPK y urea, representaron las restantes emisiones a la categoría de CC en los sistemas de análisis (Figura 29). La producción de nitrato de amonio, proveniente de la elaboración del fertilizante NPK, contribuyó 7.2, 5.8 y 13.2 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 30b). La producción de urea aportó 5.4 % a esta categoría en el sistema café-plátano.

La producción de NPK fue el principal proceso que contribuyó en la categoría de AA en los sistemas de estudio; lo que representó 78.4, 91 y 92.8 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). En la fabricación de NPK, la producción de molibdeno, nitrato de amonio y sulfato de potasio fueron los principales factores ambientales en los sistemas café-mango y café-pleno sol (Figura 30c). La elaboración de molibdeno aportó 35.6 y 35.4 en los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La fabricación de nitrato de amonio en los sistemas café-mango y café-pleno sol contribuyó 27.6 y 27.5 %, respectivamente. La producción de sulfato de potasio en los sistemas café-mango y café-pleno sol, representó 20.9 y 20.7 %, respectivamente. En el sistema café-plátano, la preparación de molibdeno, zinc, nitrato de amonio y urea aportaron 23.1, 18.0, 17.9 y 15.7 % respectivamente (Figura 30c).

En la categoría de AAF, la producción de NPK y urea representaron 46.6 y 46.8 %, respectivamente en el sistema café-plátano (Figura 29). Mientras que la fabricación de NPK contribuyó 87.6 y 89.8 % en los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La producción de nitrato de amonio derivado de la elaboración de NPK fue la principal causa en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol; la cual representó 33.3, 62.5 y 64.1 %, respectivamente (Figura 30d).

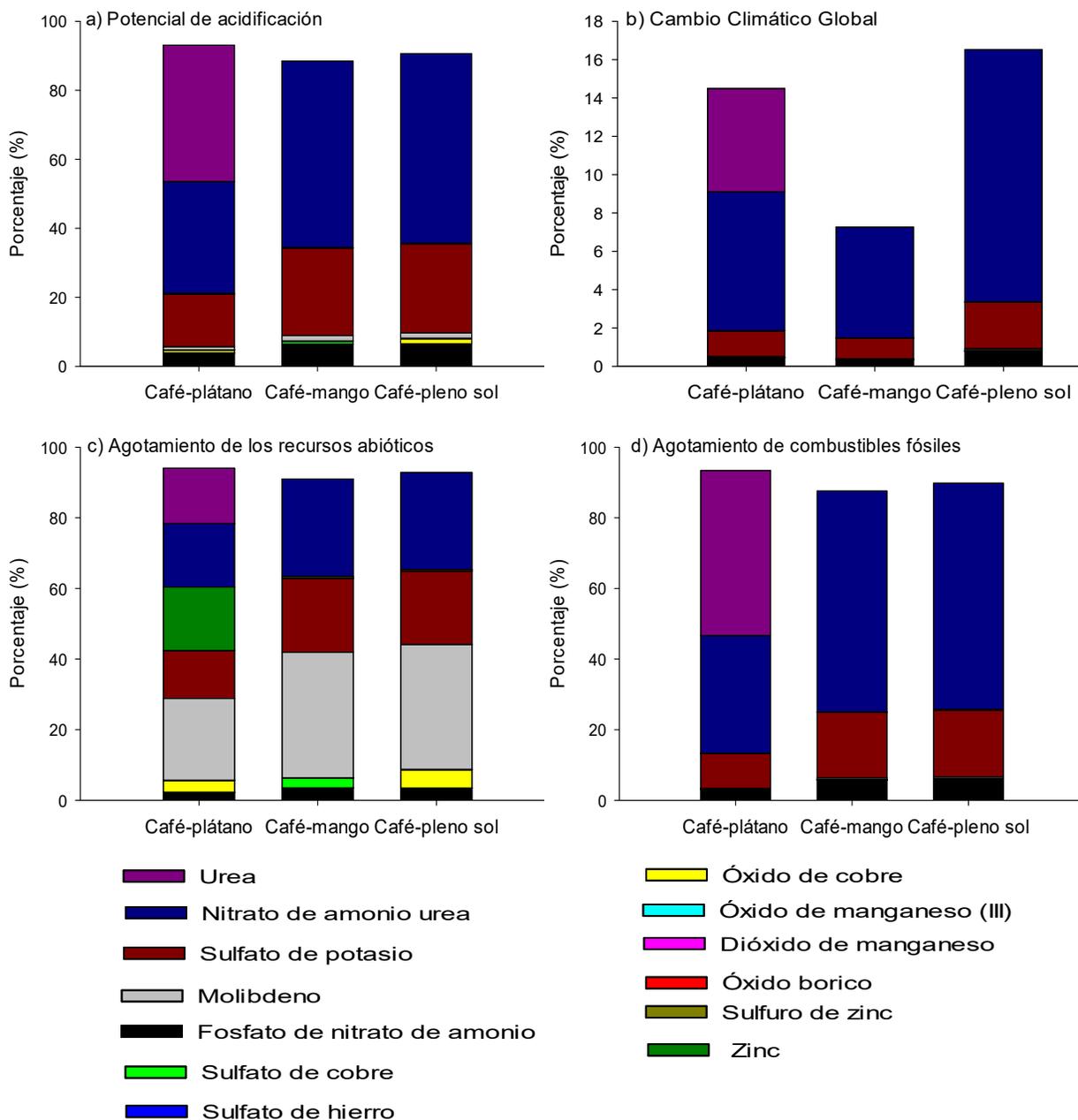


Figura 30. Impactos ambientales de la producción de urea y NPK en las categorías del ACV de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

En la categoría de E, la producción de NPK contribuyó 65.5, 81.9 y 83.0 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La producción de molibdeno y nitrato de amonio derivados de la elaboración de NPK fueron las principales fuentes ambientales que influyeron en los sistemas de análisis (Figura 30e). La producción de molibdeno aportó 25.4, 32.3 y 32.3 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La elaboración de nitrato de amonio en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol representó 26.3, 33.4 y 33.4 %, respectivamente.

En la categoría de ED, la fabricación de NPK fue el principal proceso que influyó en los sistemas de análisis; lo que representó 73.2, 91.3 y 93 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La producción de molibdeno y nitrato de amonio proveniente del fertilizante NPK fueron los principales procesos que contribuyeron a esta categoría. La elaboración de molibdeno aportó 35.9, 45.5 y 45.7 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 30f). En los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, la elaboración de nitrato de amonio representó 19.5, 24.7 y 24.8 %, respectivamente. La producción de urea proporcionó 19.9 %, en el sistema café-plátano.

En la categoría de TH, la manufacturación de NPK contribuyó 67.7, 91.7 y 93.5 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La producción de molibdeno y nitrato de amonio, derivados de la fabricación de NPK fueron los principales procesos que influyeron en esta categoría (Figura 30g). La producción de molibdeno aportó 24.1, 33.8 y 33.3 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La elaboración de nitrato de amonio en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol proporcionó 25.2, 35.4 y 34.9 %, respectivamente. En el sistema café-plátano, la producción de urea aportó 26.4 %.

En la categoría de EM, la fabricación de NPK fue la principal fuente emisora en los sistemas estudiados (Figura 29); la que aportó 71.6, 91.4 y 93.1 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La producción de molibdeno y nitrato de amonio, provenientes del fertilizante NPK, fueron los principales procesos que contribuyeron a esta categoría (Figura 30h). La elaboración de molibdeno contribuyó

34.9, 45.5 y 45.6 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La elaboración de nitrato de amonio en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol representó 19.2, 25 y 25.1 %, respectivamente. En el sistema café-plátano, la producción de urea suministró 21.8 % a esta categoría.

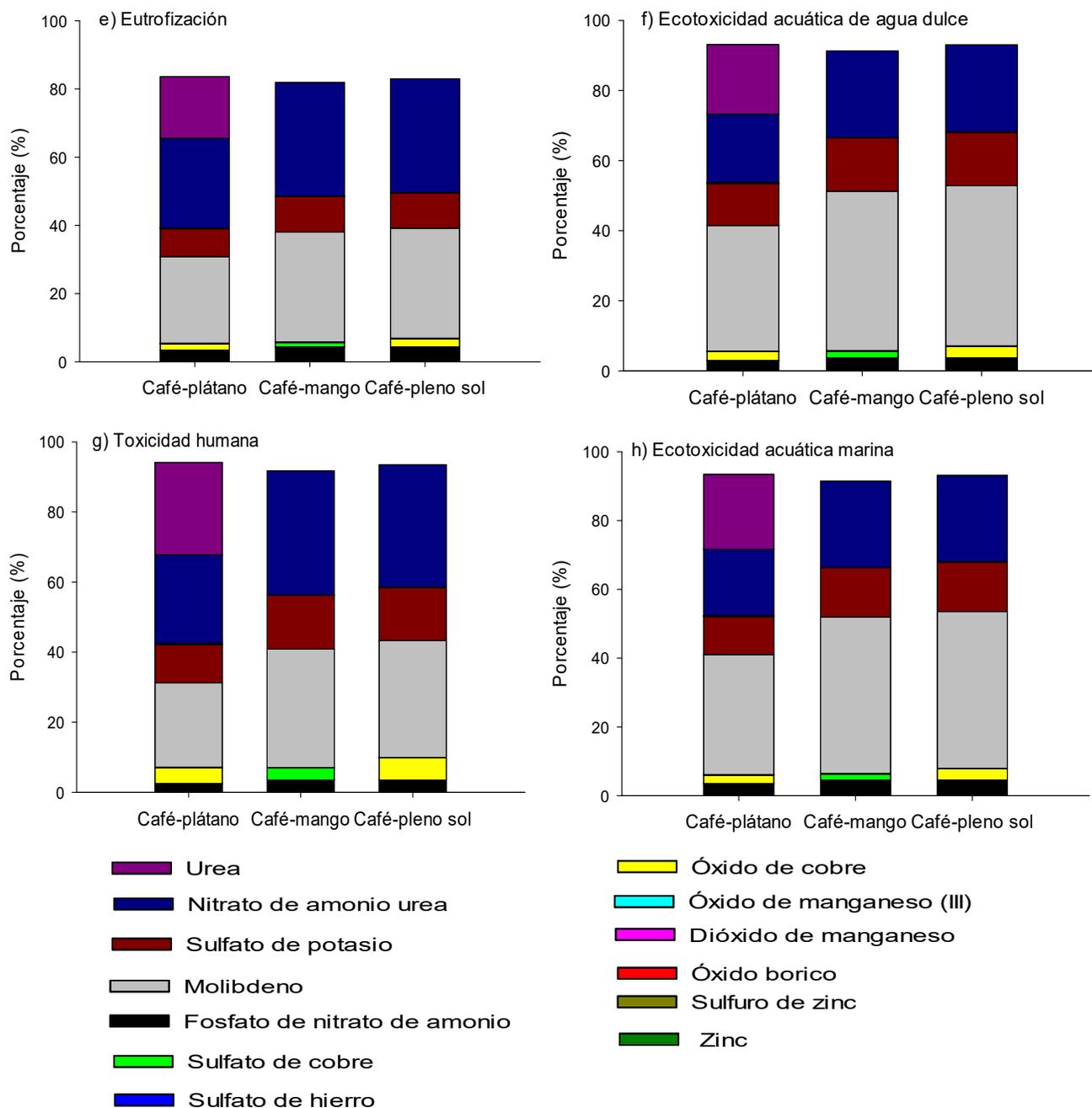


Figura 30. Continuación. Impactos ambientales de la producción de urea y NPK en las categorías del ACV de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

En la categoría de AO, la manufacturación de NPK y urea fueron los principales procesos que contribuyeron en esta categoría en el sistema café-plátano; las cuales aportaron 48.1 y 42.8 % respectivamente. La producción de NPK aportó 84.1 y 86.9 % en los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente. En la fabricación de NPK, el principal proceso que afecto esta categoría fue la elaboración de nitrato de amonio; lo que contribuyó 34.1, 59.8 y 61.4 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 30i).

En la categoría de OF, la fabricación de NPK y urea fueron las principales fuentes que contribuyeron en el sistema café-plátano; las cuales contribuyeron 50.3 y 39.4 %, respectivamente (Figura 29). La producción de NPK aportó 82.8 y 85.9 % en los sistemas café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 29). La elaboración de nitrato de amonio y sulfato de potasio derivados del fertilizante NPK fueron las principales causas en los sistemas de estudio (Figura 30j). La producción de nitrato de amonio contribuyó 28.6, 47.6 y 49 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La elaboración de sulfato de potasio en los sistemas café-mango, café-plátano y café-pleno sol representó 16.8, 27.9 y 28.8 %, respectivamente.

En la categoría de ET, la manufacturación de NPK fue la principal fuente emisora en los tres sistemas de producción (Figura 29); la cual proporcionó 55.2, 89.8 y 91.7 % en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La producción de nitrato de amonio proveniente de la fabricación de NPK fue el principal proceso que contribuyó en los sistemas de análisis (Figura 30k); la cual aportó 36.9, 60.6 y 61.3 %, en los sistemas, café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente. La producción de urea aportó 38.6 % en el sistema café-plátano (Figura 30k).

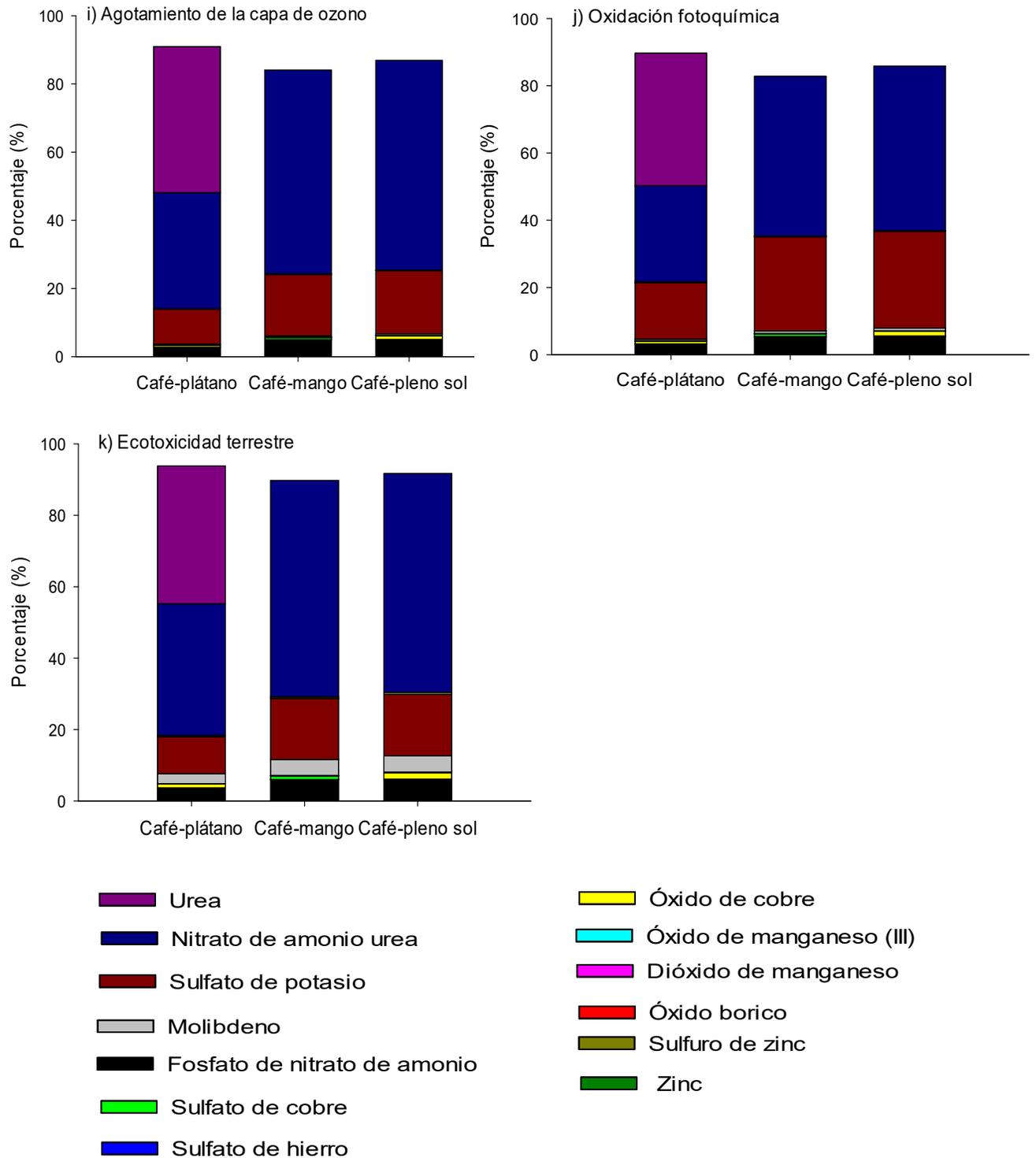


Figura 30. Continuación. Impactos ambientales de la producción de urea y NPK en las categorías del ACV de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol.

## 7. DISCUSIÓN

En la Figura 31 se observan las variables que se analizaron en las hojas del cultivo de café, hojarasca (no se separó por componentes de las diferentes especies de los sistemas de producción), horizonte de fermentación y suelo de los sistemas de estudio.

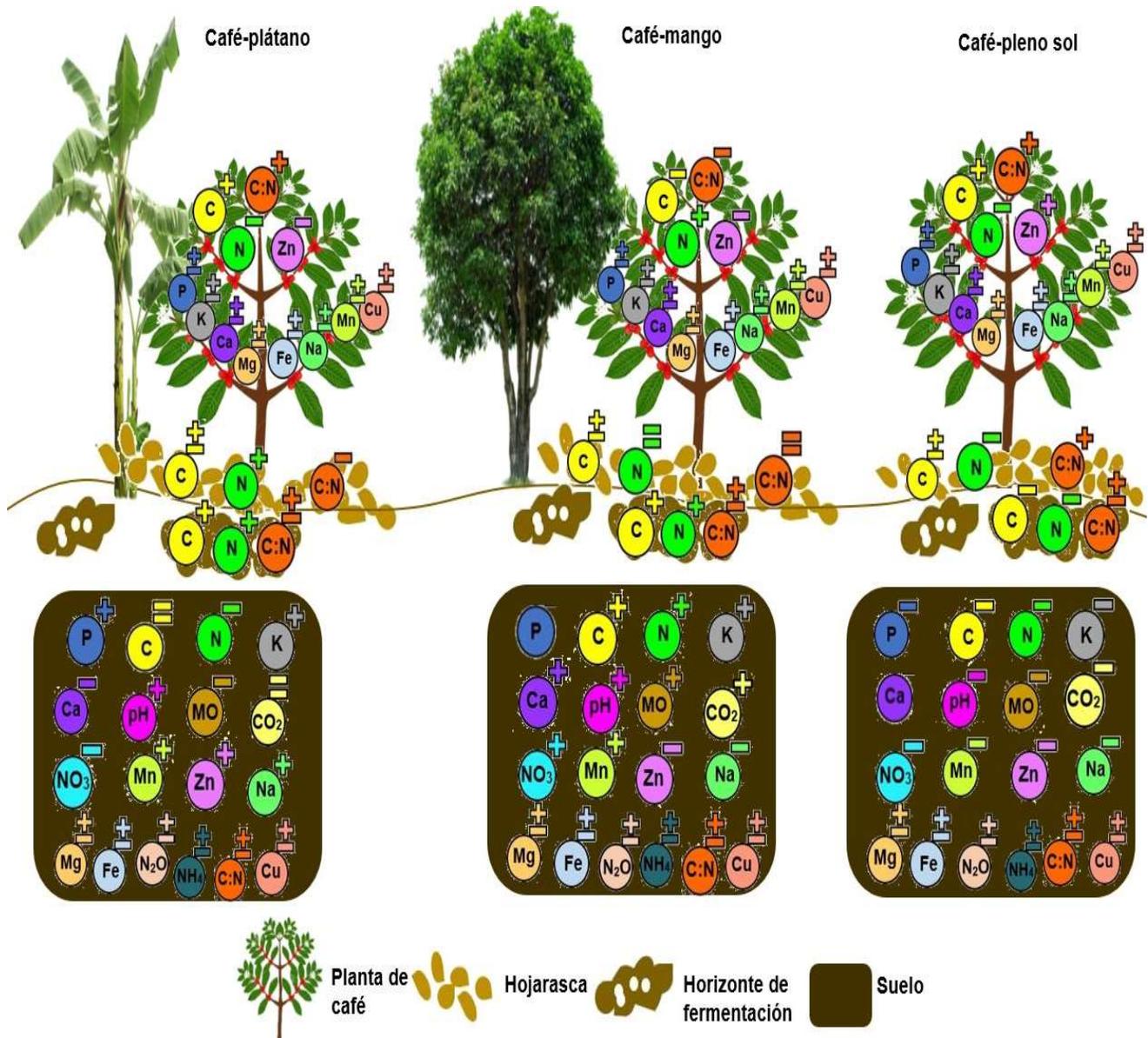


Figura 31. Variables analizadas en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol. Donde C= carbono; N=nitrógeno; C:N= relación carbono-nitrógeno; P= fósforo; K= potasio; Ca=calcio; Fe= hierro; Na= sodio; Cu=cobre; Zn= zinc; Mn= manganeso; Mg= magnesio; pH= potencial de hidrógeno; MO=materia orgánica del suelo; CO<sub>2</sub>=emisiones de dióxido de carbono; N<sub>2</sub>O=emisiones de óxido nitroso; NO<sub>3</sub>=nitratos; NH<sub>4</sub>= amonio. Los símbolos indican ± no hay diferencias significativas; + la variable se encuentra en el grupo a; - la variable se encuentra en el grupo b; = la variable se encuentra en el grupo a y b; la variable Ca en el suelo del sistema café-pleno sol se encuentra en el grupo c y la variable P en el suelo del sistema café-mango se encuentran en el grupo c.

## 7.1. Tejido vegetal

La concentración foliar de C varió entre 46.8 y 49 % (Cuadro 7). Valores similares de la concentración foliar de C fueron reportados para plantas leñosas de hoja perenne ancha (48.48 % C) (Ma et al., 2018). La concentración de C fue mayor en las hojas del cultivo de café de los sistemas café-pleno sol y café-plátano que en las hojas de café de la asociación café-mango. Esta diferencia puede estar asociada a la concentración foliar de Zn. En nuestro estudio, la concentración foliar de C se correlacionó positivamente con la concentración foliar de Zn en los sistemas café-pleno sol ( $R^2=0.97$ ) y café-plátano ( $R^2=0.98$ ). Las plantas toman el C del  $CO_2$  atmosférico y lo incorporan en su biomasa través del proceso de fotosíntesis, para formar compuestos orgánicos como carbohidratos (Weil & Brady, 2017). El Zn participa como cofactor en enzimas involucradas en la fijación de fotosíntesis y en el metabolismo de los carbohidratos de forma general y en particular de hojas (Marschner, 2012).

En el presente estudio observamos la mayor concentración foliar de N en el sistema café-mango (3.3 %) (Cuadro 7). Esto pudiera deberse a una mayor disponibilidad de N inorgánico en el suelo del sistema café-mango, lo cual es consistente con la correlación positiva encontrada entre la concentración total de N en las hojas de las plantas de café y la concentración de  $NH_4^+$  en la solución del suelo ( $R^2=0.95$ ). Frecuentemente la concentración de N en las hojas se relaciona con la concentración de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  de la solución del suelo, ya que son las formas principales de N que absorben las raíces de las plantas (Weil & Brady, 2017).

El C interactúa con el N en una compleja relación C:N, la cual se refiere a la proporción de la masa de C en relación con la masa de N en una matriz concreta. La relación C:N en los residuos orgánicos depositados naturalmente o aplicados a los suelos, se vuelve relevante por el efecto que tienen en la disponibilidad de C y N en los suelos. En el presente estudio se mantuvo una relación C:N baja (14.2) en las hojas del cultivo de café del sistema café-mango, lo cual es un indicador de mayor tasa de descomposición de este residuo foliar y por lo tanto, hay mayor tasa de mineralización de N una vez que los residuos foliares de este sistema ingresan al suelo. Esto se corrobora con lo encontrado

en nuestro estudio, donde la mayor disponibilidad de C y N se observó en el horizonte de fermentación y en la solución del suelo del sistema café-mango.

En el presente estudio se observó que la mayor concentración foliar de Zn ocurrió en el sistema café-pleno sol que en los sistemas café-plátano y café-mango. Las plantas absorben este nutriente principalmente de la solución del suelo como  $Zn^{+2}$ . En el sistema café-pleno sol, la concentración foliar de Zn y la del suelo se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.75$ ). En el sistema café-plátano la absorción de Zn por las plantas, pudo estar limitada por la alta concentración de P en la solución del suelo de este sistema. Estudios han reportado que altas concentraciones de P en la solución del suelo afectan la absorción de Zn, translocación y metabolismo (Alloway, 2008; Jones, 2002). En el sistema café-mango, la baja absorción de Zn por las plantas se debió a que el  $Zn^{2+}$  de la solución del suelo se encuentra retenido en la MOS, lo que impide que las plantas absorban este nutriente.

En cuanto a las concentraciones de los nutrientes P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu y Mn presentes en las hojas del cultivo de café, no se encontraron diferencias entre sistemas. La concentración de N, P, K, Fe, Cu y Zn que se muestran en el Cuadro 7 fueron similares a las observadas por Amador Atlahua (2019); Audate. (2016); Garza-Lau et al. (2020) en estudios realizados en sistemas agroforestales de café en Coatepec y Huatusco, Veracruz. La concentración foliar de P del presente estudio fue baja comparada con los valores que reportaron estos mismos autores. Y las concentraciones foliares de Ca, Mg y Mn de este estudio fueron altas comparadas con los autores mencionados.

Las concentraciones de los nutrientes foliares de este estudio (Cuadro 7) se compararon con los intervalos óptimos foliares que reporta Snoeck & Lambot (2004) y Willson (1985) para el cultivo de café. Estos intervalos se basan en niveles críticos de los nutrientes foliares en café en varios lugares del mundo. En los sistemas de análisis se observó que los nutrientes foliares N, Fe, Cu y Zn se encontraron en intervalos óptimos en los tres sistemas de producción. De acuerdo a Willson (1985) y Snoeck & Lambot (2004), la concentración foliar de P de las plantas de café estuvo en nivel deficiente (0.10 %) en los tres sistemas de producción. Mientras que la concentración foliar de Mn fue alta (203-275 mg  $kg^{-1}$ ) en los tres sistemas de producción. La concentración foliar de Mn se

correlacionó positivamente con la concentración de Mn en la solución del suelo de los sistemas café-plátano ( $R^2=0.98$ ) y café-pleno sol ( $R^2=0.75$ ).

De acuerdo a Snoeck & Lambot (2004) la concentración foliar de K y Ca estuvo en exceso (2.9 y 1.7 %, respectivamente) en el sistema café-mango, mientras que estos nutrientes en los sistemas café-plátano y café-pleno sol se encontraron en niveles óptimos.

## **7.2. Piso forestal**

La concentración de C en la hojarasca de los sistemas estudiados varió entre 40.8 y 43.7 % (Figura 21a). Estos valores se encuentran entre los datos que reporta la literatura para sistemas cafetaleros mexicanos donde el porcentaje de C se ubica entre 42.3 y 53 % C (Díaz Porres, 2009; Farfan & Urrego, 2007; Figueroa-Navarro et al., 2005; Osorio Moreno, 2004).

La concentración de N en la hojarasca fue de 1.3 y 1.9 % (Figura 22a). Estudios previos en sistemas agroforestales con café, reportaron valores similares a los de este estudio (1.6 y 2.4 % N) (Cardona & Sadeghian., 2005; Díaz Porres, 2009; Farfan & Urrego, 2007; Osorio Moreno, 2004). La relación C:N en la hojarasca varió entre 22 y 33 (Figura 23a). Estos valores son consistentes con el intervalo reportado en suelos cafetaleros de Veracruz (24.9 y 33.9) (Díaz Porres, 2009; Farfan & Urrego, 2007). La concentración de N en la hojarasca del sistema café-plátano fue mayor que en el sistema café-pleno sol (Figura 22a). Esta diferencia se asoció con la relación C:N de la hojarasca, la cual fue 31 % mayor en el sistema café-pleno sol, que en el sistema café-plátano. Esto es un indicador de tasa de mineralización más rápida en el residuo orgánico del sistema café-plátano que en los residuos orgánicos del cultivo de café-pleno sol.

En los horizontes de fermentación el porcentaje de C fue de 21.7 y 34.3 % (Figura 21b). Mientras que el de N osciló entre 1.2 y 1.9 % (Figura 22b) y su relación C:N entre 18 y 19 (Figura 23b). Romero Uribe. (2017) reportó valores entre 7.94 y 10.41 % de C, considerados bajos en horizontes orgánicos de suelos cafetaleros de Veracruz. Este mismo autor observó valores de N entre 0.64 y 0.85 % y una relación C:N entre 7.6 y 13.4. La mayor concentración de C y N ocurrió en los horizontes de fermentación de los sistemas de café bajo sombra. Esto probablemente esté relacionado con la cantidad y

calidad de los residuos orgánicos que aportaron los sistemas de estudio a los suelos. En el sistema café-plátano, la concentración de C total de la hojarasca se correlacionó positivamente con la concentración de C del horizonte de fermentación ( $R^2= 0.5$ ). De igual forma en este sistema, la concentración de N de la hojarasca se correlacionó positivamente con la concentración de N del horizonte de fermentación ( $R^2= 0.7$ ). En el sistema café-mango, la concentración de N de la hojarasca se correlacionó positivamente con la concentración de N del horizonte de fermentación ( $R^2=0.5$ ). Mientras que la baja concentración de C y N en el horizonte de fermentación del sistema café-pleno sol se debió a la alta relación C:N del residuo foliar y de hojarasca, las cuales fueron 31 % mayores en el sistema café-pleno sol que en los sistemas café bajo sombra. Esto es indicador de una baja tasa de mineralización de N, lo cual fue consistente con una menor concentración foliar de N total y de hojarasca, la cual fue 29 % menor en el sistema café-pleno sol que en los sistemas de café bajo sombra.

### **7.3. Suelo**

El pH del suelo varió entre 4.9 y 5.7 (Cuadro 8). Estudios previos en suelos cafetaleros de Veracruz reportaron valores semejantes a los de este estudio (4.4 y 6.1) (Amador Atlahua, 2019; Arias et al., 2012; Arteaga et al., 2012; Audate, 2016; Fernández-Ojeda et al., 2017; Garza-Lau et al., 2020; Geissert & Ibáñez, 2008; Pérez Portilla et al., 2005). Se ha observado que el pH de los suelos de los sistemas cafetaleros cultivados a pleno sol es menor que en los sistemas agroforestales de café bajo sombra (Fernández-Ojeda et al., 2017). Estos resultados son congruentes con los del presente estudio; ya que el valor de pH del suelo del sistema café-pleno sol fue menor en comparación con los sistemas café-plátano y café-mango. Tal diferencia se debió a la baja concentración de cationes ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$ ) en la solución del suelo del sistema café-pleno sol, ya que la pérdida de estos cationes de la solución del suelo hace que el suelo se vuelva más ácido (Weil & Brady, 2017).

Respecto a la concentración de nutrientes en el suelo (Cuadro 8), la de P-Bray extraíble fue de 14 y 146  $mg\ kg^{-1}$  siendo el valor más alto el del sistema café-plátano. Valores bajos de P-Bray comparables a los de este estudio fueron reportados en suelos cafetaleros de Veracruz (0.1 y 23.52  $mg\ kg^{-1}$ ) (Fernández-Ojeda et al., 2017; Geissert &

Ibáñez, 2008). La concentración de P en el sistema café-plátano fue mayor en comparación con el sistema café-pleno sol y este a su vez fue mayor que en el sistema café-mango. La diferencia entre el sistema café-plátano y los otros sistemas, se debió probablemente a la alta adición de fertilizante químico; ya que representa ingreso de nutrientes que favorecen la disponibilidad de P en el suelo. Esto es consistente con lo observado en el sistema café-plátano, donde la concentración de P del suelo y la concentración de MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.4$ ). En el sistema café-pleno sol, los ingresos de P se asociaron a la alta dosis de aplicación de fertilizante químico y de residuos foliares del cultivo de café. En este sistema la concentración de P de las hojas del cultivo de café se correlacionó positivamente con la correspondiente del suelo ( $R^2= 0.6$ ). La baja disponibilidad de P en el suelo de este sistema se debió a que los ingresos de residuos vegetales son menores (datos no publicados). En el sistema café-mango, la baja concentración de P en la solución del suelo, probablemente se debió a que el P pudo ser adsorbido en las superficies de arcillas y en los óxidos de hierro y aluminio (Chapin et al., 2002).

La concentración de K en los suelos estuvo en el intervalo de 0.46 y 1.2 meq/ 100g (Cuadro 8). Estos valores son consistentes con el rango reportado en sistemas agroforestales con café en Veracruz (0.3 y 2.1 meq/100g) (Amador Atlahua, 2019; Audate, 2016; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Fernández-Ojeda et al., 2017; Garza-Lau et al., 2020; Geissert & Ibáñez, 2008; Pérez Portilla et al., 2005). En los sistemas estudiados, la mayor concentración de K extraíble desde el suelo se observó en aquellos bajo sombra. En estos sistemas, el ingreso de nutrientes, provenientes de la adición de fertilizantes químicos y la mineralización de la hojarasca promueven la disponibilidad de este elemento. Se ha observado alta disponibilidad de K en suelos que son regularmente cubiertos de hojarasca (Snoeck & Lambot, 2004). En el sistema café-plátano la concentración de K se correlacionó positivamente con el contenido de MOS ( $R^2=0.4$ ). Otro factor que influye en la disponibilidad de K en el suelo, es el pH. Cuando el pH es menor a 5.5, el K es menos disponible en la solución del suelo (Trigiano, 2007). En nuestro estudio el pH del suelo de los sistemas bajo sombra fue de 5.7, mientras que en el sistema café-pleno sol fue de 4.9. La concentración de K del suelo y el valor de pH del

suelo se correlacionaron positivamente, en el sistema café-plátano ( $R^2=0.6$ ) y en café-mango ( $R^2= 0.5$ ).

En el caso de Ca extraíble se observaron valores entre 1.2 y 7.5 meq/ 100g (Cuadro 8), que se encuentran dentro del intervalo reportado en suelos cafetaleros de Veracruz (3.2 y 10.9 meq/100g) (Amador Atlahua, 2019; Audate, 2016; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Fernández-Ojeda et al., 2017; Garza-Lau et al., 2020; Geissert & Ibáñez, 2008; Pérez Portilla et al., 2005). La concentración de Ca en el suelo del sistema café-mago fue mayor que en el sistema café-plátano, y este a su vez fue mayor que en el sistema café-pleno sol. Esta diferencia en el sistema café-mango y los demás sistemas se debió al alto contenido de MOS (3.8%) en este sistema. La mineralización de MOS libera nutrientes como Ca haciendo disponible este nutriente en la solución del suelo. En el sistema café-plátano, la concentración foliar de Ca y la del suelo se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.6$ ) al igual que la concentración de Ca del suelo y la de MOS ( $R^2=0.7$ ). La baja concentración de Ca en este sistema se debió a la baja concentración de MOS. En el sistema café-pleno sol, la baja concentración de Ca en el suelo, también se debió a la baja concentración de MOS. En este sistema la concentración de Ca y la de MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.7$ ).

En el caso de la concentración de Zn en el suelo observamos valores entre 1.5 y 4 mg  $kg^{-1}$  (Cuadro 8) que se ubican en el intervalo de reportes previos (0.6 y 10.4 mg  $kg^{-1}$ ) (Amador Atlahua, 2019; Audate, 2016; Garza-Lau et al., 2020; Pérez Portilla et al., 2005). La máxima concentración de Zn se observó en el sistema café-plátano que en los sistemas café-mango y café-pleno sol. Esta diferencia en el sistema café-plátano se debió a la aplicación del fertilizante compuesto, el cual contiene Zn y favorece la disponibilidad de este nutriente en la solución del suelo. En el sistema café-mango, el bajo contenido de Zn se asoció a la alta concentración de MOS (3.8 %). En nuestro estudio, la concentración de MOS y Zn en el suelo del sistema café-mango, se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.8$ ). Los micronutrientes catiónicos como el Zn reaccionan con ciertas moléculas orgánicas para formar complejos organometálicos llamados quelatos. En esta forma los cationes están protegidos de la reacción con constituyentes inorgánicos del suelo que forman precipitados insolubles, no disponibles

para ser absorbidos por las plantas (Weil & Brady, 2017). Mientras que en el sistema café-pleno sol, la baja concentración de Zn en el suelo, se debió a la baja concentración de MOS. En este sistema la concentración de Zn y la de MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.8$ ).

Con respecto a las concentraciones de Mn, se observaron valores entre 4.4 y 33 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 8); lo cual fue consistente con el intervalo reportado en suelos cafetaleros de Veracruz (20.4 y 47.8 mg kg<sup>-1</sup>) (Amador Atlahua, 2019; Pérez Portilla et al., 2005). Valores altos comparables a los de este estudio fueron reportados en suelos cafetaleros de Huatusco (192.5 mg kg<sup>-1</sup>) (Audate, 2016; Garza-Lau et al., 2020). En los suelos estudiados, la mayor concentración de Mn en el suelo se observó en aquellos bajo sombra. Esto se asoció a la mineralización de la MOS que favorece la disponibilidad de Mn en la solución del suelo. En el sistema café-mango, la concentración de Mn y MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.93$ ). En el sistema café-plátano, el porcentaje foliar de Mn y el del suelo se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.98$ ). La baja concentración de Mn en el sistema café-pleno sol se relacionó con la baja concentración de MOS, donde la concentración de Mn y la de MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2=0.94$ ).

En el caso de la concentración de Na, se registraron valores entre 0 y 0.5 meq/100 g (Cuadro 8) consistentes con el intervalo reportado para suelos cafetaleros de Veracruz (0.05 - 0.08 meq/100 g) (Pérez Portilla et al., 2005). En los sistemas estudiados, la mayor concentración de Na se observó en el sistema café-plátano. En nuestro estudio, no se observó una correlación entre el Na del suelo y las variables que se midieron, que pudieran explicar esta situación. Estudios realizados en sistemas agroforestales de café, generalmente no evalúan la concentración de Na en los suelos, por lo que hacen falta más estudios en estos sistemas midiendo la concentración de Na en el suelo.

Las concentraciones de Mg, Fe y Cu no mostraron diferencias en los suelos de los tres sistemas estudiados. Valores semejantes a estas concentraciones (Mg, Fe y Cu) (Cuadro 8) fueron reportados en suelos cafetaleros (Amador Atlahua, 2019; Audate, 2016; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Fernández-Ojeda et al., 2017; Garza-Lau et al., 2020; Geissert & Ibáñez, 2008; Pérez Portilla et al., 2005).

La concentración de MOS varió entre 2.0 y 3.8 % (Cuadro 8), lo cual fue consistente con el intervalo reportado en suelos cafetaleros de Veracruz (2.7 y 11.3 %) (Amador Atlahua, 2019; Arias et al., 2012; Audate, 2016; Fernández-Ojeda et al., 2017; Garza-Lau et al., 2020; Gómez-Martínez et al., 2018; Pérez Portilla et al., 2005). En los suelos estudiados, la mayor concentración de MOS se observó en el sistema café-mango. La diferencia entre los sistemas de estudio, sería explicada por la mayor cantidad de residuos de hojarasca que aporta el sistema café-mango. Los residuos vegetales son la principal fuente de entrada de MOS, cuando esta se mineraliza se liberan C y nutrientes como nitrógeno. En el sistema café-mango la concentración de C y N fue 37 y 40 % mayor, respectivamente, en el horizonte de fermentación que en el sistema café-pleno sol. La concentración de C y N en el suelo fue dos veces mayor en el sistema café-mango que en el sistema café-pleno sol. Este C fue almacenado en la MOS del sistema café-mango. En este sistema, la concentración de la MOS se correlaciono positivamente con la concentración de C de la hojarasca ( $R^2=0.6$ ) y la concentración de C del suelo ( $R^2= 0.8$ ).

Factores como la temperatura y humedad del suelo también influyen en la descomposición de la MOS. Las condiciones ambientales que conducen a una rápida descomposición y mineralización incluyen suficiente humedad del suelo, una adecuada aireación (60 % del espacio poroso del suelo lleno con agua) temperaturas cálidas (35 °C) y un pH cercano a neutro (Weil & Brady, 2017). En nuestro estudio, el porcentaje de humedad del suelo fue 28 y 30 % mayor en el suelo del sistema café-mango que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente (Figura 24). Y la temperatura del suelo fue 20 y 23 % mayor en café-pleno sol que en los sistemas café-mango y café-plátano, respectivamente (Figura 25). En el sistema café-plátano, condiciones ambientales como el bajo porcentaje de humedad del suelo (15.6 %) y bajos ingresos de C en el suelo, fueron factores que pudieron limitar la mineralización de la MOS en este sistema. En el sistema café-pleno sol, temperatura alta (29.6 °C), bajo contenido de humedad del suelo (15 %), baja concentración de C en el horizonte de fermentación y suelo, probablemente limitaron el proceso de mineralización de la MOS.

La concentración de C en los suelos se ubicó entre 1.2 y 2.4 % (Cuadro 8). Valores altos comparables a los de este estudio fueron reportados en suelos cafetaleros de Veracruz

(2.3 y 10.0 %) (Arias et al., 2012; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Geissert & Ibáñez, 2008; Romero Uribe, 2017). Los suelos del sistema café-pleno sol mostraron empobrecimiento de C; su concentración de C fue dos veces menos que el sistema café-mango. Esto ha sido observado en otros estudios; los sistemas agroforestales de café secuestran más COS comparado con un monocultivo de café (Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Espinoza-Domínguez et al., 2012; Tumwebaze & Byakagaba, 2016; Xiao et al., 2020). Esta diferencia en el sistema café-pleno sol se asoció a que la hojarasca del café tuvo relación C:N alta (33) con bajo contenido de N (1.3 %), lo cual fue consistente con el hecho de que en el horizonte de fermentación de este sistema, la concentración de C y N fue baja limitando el ingreso de estos elementos al suelo. Los resultados del presente estudio indicaron que la fertilidad del suelo del sistema café-pleno sol fue baja (baja concentración de nutrientes y de MOS). En contraste, en el sistema café-mango, el ingreso de nutrientes y la MOS provenientes de la hojarasca y del horizonte de fermentación fueron mayores. En el sistema café-mango, la concentración de C del suelo se correlacionó positivamente con la concentración de MOS ( $R^2=0.8$ ).

La concentración de N varió entre 0.1 y 0.2 % (Cuadro 8). Esto es consistente con el intervalo reportado (0.2-0.7 %) en sistemas agroforestales de café (Arteaga et al., 2012; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Fernández-Ojeda et al., 2017; Geissert & Ibáñez, 2008; Gómez-Martínez et al., 2018; Pérez Portilla et al., 2005). La concentración de N fue mayor en el sistema café-mango que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol. Esta diferencia estuvo asociada con la concentración de MOS del sistema café-mango, la cual fue 34 y 47 % mayor que en café-plátano y café-pleno sol, respectivamente. Se sabe que la mineralización de la MOS es fuente principal de N disponible para las plantas y los microorganismos. En el sistema café-mango la concentración de N del suelo y la de MOS se correlacionaron positivamente ( $R^2= 0.6$ ). Esta diferencia entre los sistemas de estudio, también se relacionó con el tipo de especie de sombra en el cultivo de café de los sistemas de producción. El árbol de mango es perenne y la planta de plátano es caducifolia, por lo tanto, la cubierta vegetal permanece todo el año en el sistema café-mango en comparación con la cubierta de los sistemas café-plátano y café-pleno sol.

Los valores de la relación C:N variaron entre 9.5 y 10.3 (Cuadro 8). Valores semejantes a los de este estudio fueron reportados en suelos cafetaleros de Veracruz y Oaxaca (8.2 y 15.0) (Arias et al., 2012; Arteaga et al., 2012; Cristóbal-Acevedo et al., 2019; Geissert & Ibáñez, 2008; Romero Uribe, 2017).

La concentración de N inorgánico ( $\text{N-NO}_3^-$ ) varió entre 17 y 28  $\text{mg kg}^{-1}$ , mientras que la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  fue de 13 y 17  $\text{mg kg}^{-1}$  (Cuadro 8). Valores bajos de N inorgánico comparables a los de este estudio fueron reportados en suelos cafetaleros de Huatusco, Veracruz (Cristóbal-Acevedo et al., 2019). La mayor concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  se observó en el sistema café-mango. Esto se atribuyó a la alta concentración de MOS (3.8 %) en el suelo del sistema café-mango. Cuando esta se mineraliza libera nutrientes como iones  $\text{NH}_4^+$  que pueden ser oxidados a forma de  $\text{N-NO}_3^-$  a este proceso se le llama nitrificación (Weil & Brady, 2017).

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  del suelo fueron de 4.9, 6.7 y 3.2  $\text{Mg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol, respectivamente (Figura 26). Valores mayores a estos fueron reportados en sistemas agroforestales de café (7.5 y 8.4  $\text{Mg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) (Hergoualc'h et al., 2008). En suelos cafetaleros de África, las emisiones de  $\text{CO}_2$  variaron entre 6.5 a 7.6  $\text{Mg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Ortiz-Gonzalo et al., 2018). No se encontraron valores de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en sistemas agroforestales de café en México. Concordante con los valores de MOS, la emisión de  $\text{CO}_2$  desde el suelo del sistema café-mango duplicó a la correspondiente del sistema café-pleno sol. El  $\text{CO}_2$  se produce por la respiración de las raíces de las plantas y microorganismos que ocurre durante la descomposición de la hojarasca y MOS (Luo & Zhou, 2006). La mayor liberación de  $\text{CO}_2$  en el sistema café-mango pudo deberse a una mayor respiración de las raíces en este sistema ya que la concentración de C y de MOS no estuvieron correlacionadas con la producción de  $\text{CO}_2$ .

Las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes del suelo de los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol fueron de 0.62, 0.45 y 0.64  $\text{kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente (Figura 27). Valores altos a los de este estudio fueron reportados en sistemas agroforestales de Costa Rica (1.9 – 5.8  $\text{kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) por Cannavo et al. (2013); Harmand et al. (2007) y Hergoualc'h et al. (2008). En suelos cafetaleros de África, las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$

reportadas varían entre 1 y 1.9 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Ortiz-Gonzalo et al., 2018). No se encontraron valores de las emisiones de N<sub>2</sub>O en sistemas agroforestales de café en México. El N<sub>2</sub>O se produce naturalmente en los suelos a través de los procesos de nitrificación (oxidación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y desnitrificación (reducción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>). La desnitrificación es la fuente principal de N<sub>2</sub>O bajo condiciones de alto contenido de agua y aplicación de fertilizantes nitrogenados (Azam et al., 2002; Panek et al., 2000; Scheer et al., 2009; Wang et al., 2012). En los sistemas de estudio, no se observaron diferencias en las emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos estudiados (Figura 27). Probablemente esto ocurrió debido a que a pesar de que las dosis de fertilización son altas, las condiciones ambientales (alto contenido de humedad y disponibilidad de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el suelo) no son propicias para que ocurra el proceso de desnitrificación en los sistemas estudiados.

#### **7.4. Análisis del ciclo de vida**

El ACV mide los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio. En nuestro estudio, los sistemas café-plátano y café-pleno sol son los que tuvieron los mayores impactos ambientales en las categorías de PA, AA, AAF, E, ED, TH, EM, AO, OF y ET comparado con el sistema café-mango (Figura 28). Esta diferencia se debió a las dosis de fertilizantes químicos, las cuales son mayores en estos sistemas que en el sistema café-mango. El proceso que tuvo mayor impacto ambiental en casi todas las categorías fue la fabricación de los fertilizantes químicos (NPK y urea) (Figura 29).

La categoría de PA mide los principales contaminantes acidificantes, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub> (de Bruijn et al., 2002) que impactan de forma negativa en el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, entre otros sistemas. El rango de PA estuvo entre 0.001 y 0.003 kg SO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los sistemas de producción. Valores similares a los de este estudio fueron reportados en café con diferente tipo de fertilizante químico y orgánico (0.001 y 0.003 kg SO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> de café) (Vera-Acevedo et al., 2016). Los principales procesos que contribuyeron a esta categoría en los sistemas de análisis fueron la producción de nitrato de amonio y sulfato de potasio (Figura 30a). La elaboración de urea, también es factor principal en esta categoría en el sistema café-plátano.

La huella de carbono mide las emisiones totales de los GEI, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> de un producto o servicio y es expresada como dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq). En los sistemas de análisis, la huella de carbono varió entre 2.27 y 3.03 kg CO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca (Cuadro 9). Valores bajos comparables a los de este estudio, fueron reportados en sistemas agroforestales con café (0.26 – 1.25 kg CO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> de café cereza) (Jaramillo Otálvaro et al., 2017; Noponen et al., 2012; Rachawat et al., 2015). En el presente estudio, la huella de carbono fue similar en los tres sistemas de producción (Figura 28). Esto se debió a las emisiones directas de GEI (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) que provienen del uso de los fertilizantes químicos en los sistemas de análisis (Figura 29). Estudios que evaluaron el análisis del ciclo de vida en café reportaron que el uso y las altas dosis de fertilizantes (químicos y orgánicos) fue la principal causa en la huella de carbono (Trinh et al., 2020; Usva et al., 2020).

La categoría de AA se refiere a la disminución de los recursos naturales no vivos como son petróleo crudo, energía eólica y minerales (de Bruijn et al., 2002). La categoría de AA estuvo en el intervalo de 1.99 y 5.5E-06 kg de antimonio eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los sistemas estudiados (Cuadro 9). Arzoumanidis et al. (2017) reportó un valor de 0.027 kg antimonio eq kg<sup>-1</sup> café tostado empaquetado. Las principales fuentes de emisión a esta categoría fueron la producción de molibdeno, nitrato de amonio y sulfato de potasio en los sistemas café-mango y café-pleno sol. En el sistema café-plátano, la elaboración de molibdeno, nitrato de amonio, zinc y urea fueron los principales factores que influyeron en esta categoría (Figura 30c).

La categoría de AAF se refiere a la disminución de los recursos energéticos. El AAF varió entre 1.86 y 5.84 MJ kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los sistemas de producción. La producción de nitrato de amonio fue la principal causa a esta categoría en los sistemas de análisis. En el sistema café-plátano, la elaboración de urea también contribuyó a esta clase (Figura 30d).

La categoría de E mide los impactos ambientales de los nutrientes N y P como son fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), NO<sub>x</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>3</sub> en los ecosistemas acuáticos. Los valores de E estuvieron entre 0.0005 y 0.001 kg PO<sub>4</sub> eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los tres sistemas de producción. Valores similares a los de este estudio se observaron en un sistema de café

con diferente tipo de fertilizante químico y orgánico (0.001 y 0.06 kg PO<sub>4</sub> eq kg<sup>-1</sup> café) (Vera-Acevedo et al., 2016). La producción de molibdeno y nitrato de amonio fueron las principales fuentes que influyeron en la E en los sistemas de análisis (Figura 30e).

La categoría de ED mide los impactos de las sustancias tóxicas (vanadio, níquel, berilio) en estos ecosistemas. La ED fue de 0.090 y 0.24 kg 1,4-diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los sistemas de análisis (Cuadro 9). Arzoumanidis et al. (2017) reportó un valor de 0.624 kg 1,4- diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> de café tostado empaquetado. Los principales procesos que contribuyeron a esta categoría fueron la producción de molibdeno y nitrato de amonio en los sistemas de estudio (Figura 30f).

La categoría de TH, es causada por las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y partículas (arsénico, benceno) presentes en el ambiente y su impacto en la salud humana. La TH estuvo en el intervalo de 0.17 y 0.49 kg 1,4-diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca en los sistemas de análisis (Cuadro 9). Valores bajos a los de este estudio, fueron reportados en café con diferente tipo de fertilizante químico y orgánico (0.05 y 0.1 kg 1,4-diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> café) (Vera-Acevedo et al., 2016). En los sistemas estudiados los principales procesos que contribuyeron a la TH fueron la producción de molibdeno y nitrato de amonio (Figura 30g).

La categoría de EM mide los impactos de sustancias tóxicas en los ecosistemas marinos. En el presente estudio, esta categoría tuvo mayor impacto ambiental en los tres sistemas de producción. La EM en los sistemas café-plátano, café-mango y café-pleno sol fue de 555.43, 255.03 y 699.89 kg 1,4-diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca respectivamente (Cuadro 9). Arzoumanidis et al. (2017) observó un valor de 1508.919 kg 1,4- diclorobenceno eq kg<sup>-1</sup> café tostado empaquetado. Los principales procesos que contribuyeron a la EM fueron la producción de molibdeno y nitrato de amonio en los sistemas de análisis (Figura 30h). En el sistema café-plátano, la elaboración de urea también contribuyó a esta categoría (Figura 30h).

La categoría de AO se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico, debido a las emisiones antropogénicas. En los sistemas de análisis, se observaron valores entre 1.5 y 4.5E-08 kg CFC-11 eq kg<sup>-1</sup> de café cereza fresca (Cuadro 9).

Arzoumanidis et al. (2017) mostró un valor de  $1.27E-6$  kg CFC-11eq  $kg^{-1}$  de café tostado empaquetado. El principal proceso que contribuyó a esta categoría fue la producción de nitrato de amonio en los sistemas estudiados (Figura 30i). En el sistema café-plátano, la producción de urea también aportó a esta categoría (Figura 30i).

La categoría de OF se asocia con las emisiones de  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ , monóxido de carbono (CO), alcanos, alquenos e hidrocarburos aromáticos. En los sistemas de análisis, se registraron valores entre  $4.36E-05$  y  $1.2E-04$  kg etileno eq  $kg^{-1}$  de café cereza fresca. Arzoumanidis et al. (2017) observó un valor de  $0.001$  kg etileno eq  $kg^{-1}$  de café tostado empaquetado. La producción de nitrato de amonio y sulfato de potasio fueron las principales causas de emisión en los tres sistemas de estudio (Figura 30j). En el sistema café-plátano, la elaboración de urea, también es factor principal en esta categoría (Figura 30j).

La categoría de ET se refiere a los impactos de sustancias tóxicas (arsénico, cromo, vanadio, mercurio) sobre estos ecosistemas. La ET en los sistemas de producción estuvo en el intervalo de  $0.002$  y  $0.006$  kg 1,4-diclorobenceno eq  $kg^{-1}$  café cereza fresca. Estos valores se encuentran dentro del rango observado en café con diferente tipo de fertilizante químico y orgánico ( $0.001$  y  $0.01$  kg 1,4-diclorobenceno eq  $kg^{-1}$  de café (Vera-Acevedo et al., 2016). La producción de nitrato de amonio fue el principal proceso que afectó esta categoría en los sistemas estudiados (Figura 30k). En el sistema café-plátano, la elaboración de urea, también aportó a esta categoría (Figura 30k).

## 8. CONCLUSIONES

- La especie del árbol de sombra en el sistema de producción de café influye en la dinámica y disponibilidad de nutrientes, así como en la concentración de C, MOS y emisión de  $CO_2$  del suelo.
- La concentración de macronutrientes y micronutrientes en las hojas de café es diferente en los sistemas de producción principalmente en C, N, Zn y la relación C:N. La concentración de C fue 4.5 y 4.0 % mayor en los sistemas café-pleno sol y café-plátano en comparación con la correspondiente del sistema café-mango. La concentración foliar de N fue 20 y 29 % mayor en el sistema café-mango que

en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente. La concentración foliar de Zn fue 24 y 20 % mayor en el sistema café-pleno sol que en los sistemas café-plátano y café-mango, respectivamente. La relación C:N fue 24 y 31 % menor en el sistema café-mango que en los sistemas café-plátano y café-pleno sol, respectivamente.

- El sistema café-plátano es el que almacena mayor concentración de N en la hojarasca que el sistema café-pleno sol. Los sistemas café-plátano y café-mango son los que almacenan mayor concentración de C y N (aprox. 34 % y 40 %, respectivamente) en el horizonte de fermentación en comparación con el sistema de producción a pleno sol.
- Los suelos de los sistemas café-plátano y café-mango tienen mayor disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes que el sistema café-pleno sol. La concentración de C, N, calcio, nitratos, materia orgánica del suelo y la emisión de CO<sub>2</sub> del suelo fue mayor en el suelo del sistema café-mango comparado con los sistemas café-plátano y café-pleno sol. No se observaron diferencias en las emisiones de N<sub>2</sub>O de los sistemas de producción. La emisión de CO<sub>2</sub> del suelo del sistema café-mango fue el doble que la correspondiente del sistema café-pleno sol. Esta liberación de C, es indicador de que el sistema café-mango almacena mayor cantidad de C en el suelo. Este sistema posee características favorables en su fertilidad físico-química que probablemente lo haría más resiliente a los efectos del CCG, además de potencial de mitigación de CO<sub>2</sub> atmosférico.
- El análisis del ciclo de vida, mostró que la huella de carbono fue similar en los sistemas de producción de café bajo sombra y a pleno sol. Y que el sistema de producción café-mango es el que tuvo el menor impacto ambiental.
- La información generada a partir de este estudio es relevante desde el punto de vista de monitoreo y generación de línea base de emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en los suelos de sistemas agroforestales de producción de café de este sitio de estudio. Esta investigación demuestra que los árboles de sombra en sistemas de producción de café son clave en la formación y emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, los cuales deben considerarse para futuros estudios.

## 9. LITERATURA CITADA

- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition*. International Zinc Association & International Fertilizer Industry Association.
- Amador Atlahua, L. (2019). *Manejo nutrimental del café bajo sombra y calidad sensorial en Coatepec, Veracruz* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/538>.
- Andersson, K., Brynolf, S., Landquist, H., & Svensson, E. (2016). Methods and tools for environmental assessment. En K. Andersson, S. Brynolf, J. F. Lindgren, & M. Wilewska-Bien (Eds.), *Shipping and the environment: improving environmental performance in marine transportation* (pp. 265-293). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49045-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49045-7_9).
- Arias, R. M., Heredia-Abarca, G., Sosa, V. J., & Fuentes-Ramírez, L. E. (2012). Diversity and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores under different coffee production systems and in a tropical montane cloud forest patch in Veracruz, Mexico. *Agroforestry Systems*, 85(1), 179-193. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9414-3>.
- Arteaga, G. A., Ibáñez Huerta, A., García Calderón, N. E., & Gonzalo, A. M. (2012). Carbon storage and stability of soil organic matter in a coffee agroecosystem in Sierra sur de Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15(3), Article 3. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1561>.
- Arzoumanidis, I., Salomone, R., Petti, L., Mondello, G., & Raggi, A. (2017). Is there a simplified LCA tool suitable for the agri-food industry? an assessment of selected tools. *Journal of Cleaner Production*, 149, 406-425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.059>.
- Audate, E. (2016). *Diagnóstico nutrimental de tres sistemas agroforestales de coffea arábica L. cultivado bajo sombra Veracruz, México* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/548>.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gomez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(30), 32-35.
- Azam, F., Müller, C., Weiske, A., Benckiser, G., & Ottow, J. (2002). Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 35(1), 54-61. <https://doi.org/10.1007/s00374-001-0441-5>.
- Aziz, S. A., & Karim, S. M. (2016). The effect of some soil physical and chemical properties on soil aggregate stability in different locations in Sulaimani and Halabja governorate. *Open Journal of Soil Science*, 6(4), 81-88. <https://doi.org/10.4236/ojss.2016.64009>.

- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>.
- Bremner, J. M. (1965). Inorganic forms of nitrogen. En *Methods of soil analysis* (pp. 1179-1237). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c33>.
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., & Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1), 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>.
- Campos, P. (2002). *Biology*. Editorial Limusa. <https://books.google.com.mx/books?id=Ql0tHB80XqIC>.
- Cannavo, P., Harmand, J. M., Zeller, B., Vaast, P., Ramírez, J. E., & Dambrine, E. (2013). Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica*-*Inga densiflora* agroforestry system: a <sup>15</sup>N labeled fertilizer study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 95(3), 377-394. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9571-z>.
- Capa, D., Pérez-Esteban, J., & Masaguer, A. (2015). Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N<sub>2</sub>O emissions. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1551-1559. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0316-z>.
- Cardona C., D. A., & Sadeghian K., S. (2005). *Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de Inga spp.* <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/196>.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria) (2018). *Reporte: el café en México, diagnóstico y perspectiva* (p. 33). <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/30El%20caf%C3%A9%20en%20M%C3%A9xico:%20diagn%C3%B3stico%20y%20perspectiva.pdf>.
- Chang, E.-H., Wang, C.-H., Chen, C.-L., & Chung, R.-S. (2014). Effects of long-term treatments of different organic fertilizers complemented with chemical N fertilizer on the chemical and biological properties of soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(4), 499-511. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.917333>.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Mooney, H. A. (2002). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag.
- Chen, C., Liu, W., Jiang, X., & Wu, J. (2017). Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: implications for land use. *Geoderma*, 299, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.021>.
- Chenu, C., Rumpel, C., & Lehmann, J. (2015). Methods for studying soil organic matter: nature, dynamics, spatial accessibility, and interactions with minerals. En Eldor. A.

- Paul (Ed.), *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (4.<sup>a</sup> ed., p. 598). Academic Press, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05497-2>.
- Clarke, R. J., & Macrae, R. (Eds.). (1985). *Coffee: volume 1: chemistry*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4948-5>.
- Copeland, R. A. (2004). *Enzymes: a practical introduction to structure, mechanism, and data analysis*. Wiley. [https://books.google.com.mx/books?id=14nqcel\\_s\\_ywC](https://books.google.com.mx/books?id=14nqcel_s_ywC).
- Coyne, M. S., & Frye, W. W. (2005). Nitrogen in soils. En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 13-21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00205-8>.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>.
- Cristóbal-Acevedo, D., Tinoco, J., prado hernández, J., & Acosta, E. (2019). Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry and coffee monoculture systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25, 169-184. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.070>.
- Curran, M. A. (2016). Life-Cycle Assessment. En B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)* (pp. 359-366). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09700-1>.
- Davis, A. P., Chadburn, H., Moat, J., O'Sullivan, R., Hargreaves, S., & Nic Lughadha, E. (2019). High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. *Science Advances*, 5(1), eaav3473. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3473>.
- de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., Guinee, J. B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., & Udo de Haes, H. A. (2002). Impact assessment. En H. de Bruijn, R. van Duin, M. A. J. Huijbregts, J. B. Guinee, M. Gorree, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, & H. A. Udo de Haes (Eds.), *Handbook on Life Cycle Assessment: operational guide to the ISO Standards* (pp. 63-95). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7\\_9](https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7_9).
- Dendooven, L., Gutiérrez-Oliva, V. F., Patiño-Zúñiga, L., Ramírez-Villanueva, D. A., Verhulst, N., Luna-Guido, M., Marsch, R., Montes-Molina, J., Gutiérrez-Miceli, F. A., Vásquez-Murrieta, S., & Govaerts, B. (2012). Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Science of The Total Environment*, 431, 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.029>.

- Dendooven, L., Patiño-Zúñiga, L., Verhulst, N., Boden, K., García-Gaytán, A., Luna-Guido, M., & Govaerts, B. (2014). Greenhouse gas emissions from nontilled, permanent raised, and conventionally tilled beds in the central highlands of Mexico. *Journal of Crop Improvement*, 28(4), 547-574. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.924328>.
- Descroix, F., & Snoeck, J. (2004). Environmental factors suitable for coffee cultivation. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: growing, processing, sustainable production*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527619627.ch6>.
- Dey, P. M., & Harborne, J. B. (1997). *Plant biochemistry*. Elsevier Science. <https://books.google.com.mx/books?id=NmKF0hxhpdMC>.
- Díaz Porres, M. (2009). *Producción, descomposición de hojarasca y macroinvertebrados fragmentadores en cuatro agroecosistemas de la cuenca del río la vieja* [Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1463>.
- Ley General de Cambio Climático, última reforma DOF 06-11-2020. Diario Oficial de la Federación (2012). <https://www.dof.gob.mx/>.
- Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, 92(2), 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>.
- Domínguez, J., Rodríguez-Martínez, A., Romero, R., & Herrera, I. (2014). Life Cycle Assessment on real time in a coffee machine. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 8, 1142-1149. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.12.007>.
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., & Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*, 90(3), 433-445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>.
- Ellis, B., & Foth, H. (1996). *Soil Fertility* (2.<sup>a</sup> ed.). CRC Press. <https://books.google.com.mx/books?id=URT1qVstE0kC>.
- Esperón-Rodríguez, M., Bonifacio-Bautista, M., & Barradas, V. L. (2016). Socioeconomic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. *Ambio*, 45(2), 146-160. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0690-4>.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 18, 57-70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>.
- Fairtrade Foundation. (2020). *Coffee farmers*, Fairtrade Foundation. <https://www.fairtrade.org.uk/Farmers-and-Workers/Coffee>.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura) (2020). *FAOSTAT Production, Crops*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- FAO, & GTIS (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo) (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. Roma, Italia.
- Farfan V., F. F., & Urrego, J. B. (2007). Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica* *Cordia alliodora* *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé*, 58(1), 20-39.
- Fernández-Ojeda, P. R., Cristóbal Acevedo, D., Villanueva Morales, A., & Uribe Gómez, M. (2017). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65-78. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i35.75>.
- Figueroa-Navarro, C., Etchevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Acosta-Mireles, M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 57-64.
- Findlay, S. E. G. (2013). Organic Matter Decomposition. En K. C. Weathers, D. L. Strayer, & G. E. Likens (Eds.), *Fundamentals of ecosystem science* (p. 312). Academic Press, Elsevier.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130164. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>.
- Galloway, J. (2003). The global nitrogen cycle. *Treatise on Geochemistry*, 8, 557-583. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/08160-3>.
- Galloway, J., Aber, J., Erisman, J. W., Seitzinger, S., Howarth, R., Cowling, E., & Cosby Jr, B. (2003). The nitrogen cascade. *BioScience*, 53(4), 341-356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2).
- Galloway, J., Dentener, F., Boyer, E., Howarth, R., Seitzinger, S., Asner, G., Cleveland, C., Green, P., Holland, E., Karl, D., Michaels, A., Porter, J., Townsend, A., & Vöosmarty, C. (2004). Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70, 153-226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>.
- Galloway, J. N. (1998). The global nitrogen cycle: changes and consequences. *Environmental Pollution*, 102(1), 15-24. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80010-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80010-9).

- Galloway, J. N., Schlesinger, W. H., Levy II, H., Michaels, A., & Schnoor, J. L. (1995). Nitrogen fixation: anthropogenic enhancement environmental response. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2), 235-252. <https://doi.org/10.1029/95GB00158>.
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seitzinger, S. P., & Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878), 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>.
- Garza-Lau, R., Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., & Torres-Rivera, J. A. (2020). Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 25-32. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2210>.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3-4), 259-288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>.
- Geissert, D., & Ibáñez, A. (2008). Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. En R. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, & K. Mehltreter (Eds.), *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación* (p. 348). Instituto de Ecología e Instituto Nacional de Ecología.
- Girard, J. (2013). *Principles of environmental chemistry* (3.<sup>a</sup> ed.). Jones & Bartlett Publishers. <https://books.google.com.mx/books?id=LFTxgCjZ0pgC>.
- Gómez-Martínez, M. J., Padilla, G., Charbonnier, F., Sánchez Viveros, G., & Cerdán, C. R. (2018). Tree assemblages in agroforestry systems with different intensity of management in Veracruz, Mexico. *Ciencias Ambientales (Tropical Journal of Environmental Science)*, 55(2), 16-38. <https://doi.org/10.15359/rca.52-2.2>.
- Greaves, J. E., & Carter, E. G. (1920). Influence of moisture on the bacterial activities of the soil. *Soil Science*, 10(5), 361-388. <https://doi.org/10.1097/00010694-192011000-00004>.
- Groffman, P., & Rosi-Marshall, E. (2013). The nitrogen cycle. En K. C. Weathers, D. L. Strayer, & G. E. Likens (Eds.), *Fundamentals of ecosystem science* (p. 312). Academic Press, Elsevier.
- Guimarães, R. J., Borém, F. M., Shuler, J., Farah, A., & Romero, J. C. P. (2019). Coffee growing and post-harvest processing. En A. Farah (Ed.), *Coffee production, quality and chemistry* (p. 836). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00026>.
- Harmand, J.-M., Ávila, H., Dambrine, E., Skiba, U., de Miguel, S., Renderos, R. V., Oliver, R., Jiménez, F., & Beer, J. (2007). Nitrogen dynamics and soil nitrate retention in a *coffea arabica eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica. *Biogeochemistry*, 85(2), 125-139. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9120-4>.

- Hergoualc'h, K., Skiba, U., Harmand, J.-M., & Hénault, C. (2008). Fluxes of greenhouse gases from andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry*, 89(3), 329-345. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9222-7>.
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>.
- Hill, J. W., & Kolb, D. K. (1999). *Química para el nuevo milenio* (8.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación. <https://books.google.com.mx/books?id=ZM-qMxtLABUC>.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindu, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G., Halim, S. A., Achlatis, M., ... Sherstyukov, B. (2018). Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C*. (p. 138).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2007). *Conjunto de datos vectorial edafológico*. INEGI. Mapas. Edafología. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap3\\_suelos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2008). *Mapas. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. INEGI. Datos. Mapas. Climatología. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III*. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva\\_estruc/702825076221.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva_estruc/702825076221.pdf).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2021). *Catálogo único de claves de áreas geoestadísticas estatales, municipales y localidades*. INEGI. Marco Geoestadístico. <https://www.inegi.org.mx/app/ageem/>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C. A. Johnson, Eds.). [https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC\\_SynthesisReport.pdf](https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019). Summary for policymakers. En P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira,

- P. Vyas, E. Huntley, ... J. Malley (Eds.), *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- ISO (International Organization for Standardization) (2006a). *ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment, principles and framework*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html>.
- ISO (International Organization for Standardization) (2006b). *ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment, requirements and guidelines*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/84/38498.html>.
- ITC (International Trade Centre) (2011). *Guía del exportador de café. Tercera edición* (3.<sup>a</sup> ed.). Centro de Comercio Internacional. <https://www.intracen.org/guia-del-exportador-de-cafe-tercera-edicion/>.
- Jaramillo Otálvaro, S. E., Osorio Saraz, J. A., & Correa Londoño, G. A. (2017). Emisión y fijación de gases efecto invernadero en zonas con potencial de producción de cafés especiales en Antioquia-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 70(3), 8341-8349. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n3.62639>.
- Jones, J., J. Benton. (2002). *Agronomic handbook: management of crops, soils and their fertility*. CRC Press.
- Jonker, G., & Harmsen, J. (2012). Creating design solutions. En G. Jonker & J. Harmsen (Eds.), *Engineering for sustainability* (pp. 61-81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53846-8.00004-4>.
- Kaiser, M., Ellerbrock, R. H., & Gerke, H. H. (2008). Cation exchange capacity and composition of soluble soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1278-1285. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0340>.
- Kersebaum, K. C., Hecker, J. M., Mirschel, W., & Wegehenkel, M. (Eds.). (2007). *Modelling water and nutrient dynamics in soil, crop systems: applications of different models to common data sets, proceedings of a workshop held 2004 in Müncheberg, Germany*. Springer Science & Business Media. <https://books.google.com.mx/books?id=ZcMpfvPYzbgC>.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.
- Lelieveld, J., & Dentener, F. J. (2000). What controls tropospheric ozone? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D3), 3531-3551. <https://doi.org/10.1029/1999JD901011>.
- Liu, J., Wang, Z., Hu, F., Xu, C., Ma, R., & Zhao, S. (2020). Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-

- term natural restoration grassland. *CATENA*, 190, 104526. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104526>.
- Liu, X., Fan, Y., Long, J., Wei, R., Kjelgren, R., Gong, C., & Zhao, J. (2013). Effects of soil water and nitrogen availability on photosynthesis and water use efficiency of *Robinia pseudoacacia* seedlings. *Journal of Environmental Sciences*, 25(3), 585-595. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60081-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60081-3).
- Liu, Y., Tian, F.-P., Jia, P.-Y., Zhang, J.-G., & Wu, G.-L. (2016). *Cultivated grasslands present a higher soil organic carbon sequestration efficiency under leguminous than under gramineous species*. <https://doi.org/10.5194/se-2016-109>.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). *Soil respiration and the environment*. Elsevier Academic Press. <https://books.google.com.mx/books?id=Y458IAEACAAJ>.
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., Zhou, T., Huang, K., Shen, H., & Fang, J. (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 15(3), 693-702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>.
- Machado, A. S. P. (2005). *Estimating nitrogen mineralization potential of soils and the effect of water and temperature and crop residues on nitrogen net mineralization*. Cuvillier. <https://books.google.com.mx/books?id=vh2ANnDDyCgC>.
- Mariño, Y. A. (2014). Respuesta fotosintética de *coffea arabica* a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica*, 63(2), 1-10.
- Marschner, P. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (Third edition). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. de J., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66-93.
- Matson, P. A. (2012). From global environmental change to sustainability science: ecosystem studies in the Yaqui Valley, Mexico. En K. C. Weathers, D. L. Strayer, & G. E. Likens (Eds.), *Fundamentals of ecosystem science* (pp. 233-241). Academic Press, Elsevier.
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M. G., Sapkota, T., Tubiello, F. N., & Xu, Y. (2019). Food security. En P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, ... J. Malley (Eds.), *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial*

*ecosystems.*

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/08\\_Chapter-5\\_3.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/08_Chapter-5_3.pdf).

- Mogge, B., Kaiser, E.-A., & Munch, J.-C. (1999). Nitrous oxide emissions and denitrification N-losses from agricultural soils in the Bornhöved lake region: influence of organic fertilizers and land-use. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(9), 1245-1252. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00039-5).
- Moguel, P., & Toledo, V. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13, 11-21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (1996). *El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad*. 43. <http://www.ejournal.unam.mx/cns/no43/CNS04306.pdf?iframe=true&width=90%&height=90%>.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (2004). Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *CONABIO*, 55, 1-7.
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>.
- Murray, R. M., Orozco, M. G., Hernández, A., Lemus, C., & Nájera, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 23-31.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Zhang, H., Aamaas, B., Boucher, O., Dalsøren, S. B., Daniel, J. S., Forster, P., ... Shine, K. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. En *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 82).
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis* (pp. 961-1010). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.
- Nieder, R., & Benbi, D. K. (2008). *Carbon and nitrogen in the terrestrial environment*. Springer Netherlands. <https://books.google.com.mx/books?id=5QT7HsvjmFwC>.
- Noponen, M. R. A., Edwards-Jones, G., Haggard, J. P., Soto, G., Attarzadeh, N., & Healey, J. R. (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 151, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019>.

- OIC (Organización Internacional del Café) (2019). *Coffee development report 2019 growing for prosperity economic viability as the catalyst for a sustainable coffee sector* (p. 84). <https://www.internationalcoffeecouncil.org/media/coffeeDevelopmentReport.pdf>.
- OIC (Organización Internacional del Café) (2021). *Estadísticas del comercio*. Organización Internacional del Café. [http://www.ico.org/ES/trade\\_statistics.asp?section=Estad%EDstica](http://www.ico.org/ES/trade_statistics.asp?section=Estad%EDstica).
- Ondrasek, G., Bakić Begić, H., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R., & Rengel, Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of the total environment*, 658, 1559-1573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>.
- Ortiz-Gonzalo, D., de Neergaard, A., Vaast, P., Suárez-Villanueva, V., Oelofse, M., & Rosenstock, T. S. (2018). Multi-scale measurements show limited soil greenhouse gas emissions in Kenyan smallholder coffee dairy systems. *Science of the Total Environment*, 626, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.247>.
- Osorio Moreno, V. E. (2004). *Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:80/handle/11554/1068>.
- Pace, M. L., & Lovett, G. M. (2013). Primary production: the foundation of ecosystems. En K. C. Weathers, D. L. Strayer, & G. E. Likens (Eds.), *Fundamentals of ecosystem science* (1st Edition). Academic Press, Elsevier. <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/707/1/arc017%2802%2951-60.pdf>
- Panek, J. A., Matson, P. A., Ortíz-Monasterio, I., & Brooks, P. (2000). Distinguishing nitrification and denitrification sources of N<sub>2</sub>O in a mexican wheat system using 15N. *Ecological Applications*, 10(2), 506-514. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0506:DNADSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0506:DNADSO]2.0.CO;2).
- Paracer, S., & Ahmadjian, V. (2000). *Symbiosis: an introduction to biological associations*. Oxford University Press. <https://books.google.com.mx/books?id=OmZ6CfHQIZ8C>.
- Paz-Pellat, F., & Libert, A. (2019). Desarrollo de mecanismos financieros alternativos para cafetales bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas, México. *Elementos para Políticas Públicas*, 3(2), 163-182.
- PECC (Programa Especial de Cambio Climático) (2014). *Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2014-2018*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314952/Logros\\_PECC\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314952/Logros_PECC_2016.pdf).

- Pérez Portilla, E., Partida Sedas, J. G., & Martínez Pérez, D. (2005). Determinación de las subdenominaciones de origen del café Veracruz (estudio preliminar). *Revista de Geografía Agrícola*, 35, 23-38. Redalyc.
- Pezo, D., Muschler, R., Tobar, D., & Pulido, A. (2019). *Intervenciones y tecnologías ambientalmente racionales (TAR) para la adaptación al cambio climático del sector agropecuario de América Latina y el Caribe*. Inter-American Development Bank.
- Rachawat, T., Chiarakorn, S., & Chidthaisong, A. (2015). Greenhouse gas emissions of robusta coffee plantation in Thailand. *Undefined*. /paper/Greenhouse-Gas-Emissions-of-Robusta-Coffee-in-Rachawat-Chiarakorn/ffade73809421deec892f07b17ccfa930bec0fe7.
- Ratchawat, T., Panyatona, S., Nopchinwong, P., Chidthaisong, A., & Chiarakorn, S. (2020). Carbon and water footprint of Robusta coffee through its production chains in Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2415-2429. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0299-4>.
- Rivera, E., Ramón. (1988). *Nutrición, fertilización y balance del fertilizante nitrogenado (15N) para el cafeto en un suelo ferralítico rojo compactado* [Tesis de Doctorado, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1292.2001>.
- Rivera Silva, M. del R., Nikolskii Gavrilov, I., Castillo Álvarez, M., Ordaz Chaparro, V. M., Díaz Padilla, G., & Guajardo Panes, R. A. (2013). Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica L.*) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313.
- Rodríguez, R. O., & Hernández, R. M. (2012). Efecto de abonos orgánicos en las propiedades químicas del suelo y el rendimiento de la mora (*Rubus adenotrichus*) en dos zonas agroecológicas de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 25(1), 16-31.
- Romero Uribe, H. M. (2017). *Cambios en el almacén de carbono y nitrógeno edáficos en diferentes tipos de uso de suelo y a diferentes profundidades, en el centro de Veracruz, México*. [Tesis de Maestría, INECOL, Instituto de Ecología, A.C.]. [http://posgrado.inecol.edu.mx/SCE/\\_lib/file/doc\\_estud\\_tesis/MM14019\\_tesis.PDF](http://posgrado.inecol.edu.mx/SCE/_lib/file/doc_estud_tesis/MM14019_tesis.PDF)
- Rusell, F., & Gilmore, D. (2018). *Experiments in soil biology and biochemistry*. Scientific e-Resources,. [https://books.google.com.mx/books?id=1\\_3EDwAAQBAJ](https://books.google.com.mx/books?id=1_3EDwAAQBAJ).
- SAIC (Scientific Applications International Corporation) (2006). *Life Cycle Assessment: principles and practice*. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). <http://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/library/detalles/es/c/266245/>.
- Salinas, B. (2008). *Life Cycle Assessment of coffee production*.

- Salomone, R. (2003). Life Cycle Assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 1, 295-300.
- Samper, L., Giovannucci, D., & Vieira, L. (2017). *The powerful role of intangibles in the coffee value chain*. World Intellectual Property Organization (WIPO).
- Saugier, B., & Pontailier, J. Y. (2006). El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*, 41(3), 71-85.
- Scheer, C., Wassmann, R., Butterbach-Bahl, K., Lamers, J., & Martius, C. (2009). The relationship between N<sub>2</sub>O, NO, and N<sub>2</sub> fluxes from fertilized and irrigated dryland soils of the aral sea basin, Uzbekistan. *Plant and Soil*, 314. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9728-8>.
- Schlesinger, W. H. (1997). *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic Press.
- Seguel S., O., García de Cortázar G. de C, V., & Casanova P., M. (2003). Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63, 287-297.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2013). Suelos. En *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental*. SEMARNAT. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap3\\_suelos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf).
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2020). *Contribución determinada a nivel nacional: México ante el cambio climático. Versión actualizada 2020*. <https://cambioclimatico.gob.mx/contribucion-determinada-a-nivel-nacional-actualizacion-2020/>.
- SEMARNAT, & INECC (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2018). *México, sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117>
- Sevenster, M., & Verhagen, A. (2010). *GHG emissions of green coffee production: toward a standard methodology for carbon footprinting: report*. <https://research.wur.nl/en/publications/ghg-emissions-of-green-coffee-production-toward-a-standard-method>.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018* (1.<sup>a</sup> ed.). SAGARPA & SIAP. [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018).

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2019). *Panorama Agroalimentario 2019* (Primera). SIAP.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2021). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Sileshi, G. W., Mafongoya, P. L., Akinnifesi, F. K., Phiri, E., Chirwa, P., Beedy, T., Makumba, W., Nyamadzawo, G., Njoloma, J., Wuta, M., Nyamugafata, P., & Jiri, O. (2014). Agroforestry: fertilizer trees. En N. K. Van Alfen (Ed.), *Encyclopedia of agriculture and food systems* (pp. 222-234). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00022-X>.
- Silverstein, A., Silverstein, V. B., & Nunn, L. S. (2007). *Photosynthesis*. Twenty-First Century Books.
- Smil, V. (2002). Nitrogen and food production: proteins for human diets. *Ambio*, 31, 126-131. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.126>.
- Smil, V. (2004). *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional) (2021). *Normales climatológicas 1981-2010. Estado de Veracruz. Estación: Emiliano Zapata (CFE)*. Servicio Meteorológico Nacional. Información Estadística Climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver>.
- Snoeck, J., & Lambot, Ch. (2004). Crop maintenance. Fertilization. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: growing, processing, sustainable production: a guidebook for growers, processors, traders and researchers*. (pp. 246-269). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. Weinheim. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527619627.ch8a>.
- Soto-Pinto, L., Jimenez-Ferrer, G., Guillén, A., De, B., Bergsma, J., & Esquivel-Bazán, E. (2005). Experiencia agroforestal para la captura de carbono en comunidades indígenas de México. *Revista Forestal Iberoamerica*.
- Strohfeltd, K. A. (2015). *Essentials of inorganic chemistry: for students of pharmacy, pharmaceutical sciences and medicinal chemistry*. Wiley. <https://books.google.com.mx/books?id=kaN2BgAAQBAJ>.
- Suárez, F. (1993). *Agricultura, biotecnología y propiedad intelectual* (IICA, Ed.). IICA. <https://books.google.com.mx/books?id=fy5jAAAAIAAJ>.

- Suárez Pascua, D. A. (2002). *Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento en carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:80/handle/11554/3735>.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., & Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1413-1421. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.017>.
- The SAS system. (2011). *SAS (Statistical Analysis System)*.
- Trigiano, R. N. (2007). *Plant pathology concepts and laboratory exercises*. CRC Press.
- Trinh, L. T. K., Hu, A. H., Lan, Y. C., & Chen, Z. H. (2020). Comparative life cycle assessment for conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(3), 1307-1324. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02539-5>.
- Tumwebaze, S. B., & Byakagaba, P. (2016). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>.
- UNEP (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2020). *Emissions Gap Report 2020*. <https://www.unep.org/interactive/emissions-gap-report/2020/>.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2020). *Coffee summary*. Foreign Agricultural Service. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>.
- Usva, K., Sinkko, T., Silvenius, F., Riipi, I., & Heusala, H. (2020). Carbon and water footprint of coffee consumed in Finland, life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 1976-1990. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01799-5>.
- van Rikxoort, H., Schroth, G., Laderach, P., & Rodríguez-Sánchez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 887-897. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8>.
- Vera-Acevedo, L. D., Vélez-Henao, J. A., & Marulanda-Grisales, N. (2016). Assessment of the environmental impact of three types of fertilizers on the cultivation of coffee at the las delicias indigenous reservation (Cauca) starting from the life cycle assessment. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 81, 93-101.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernandez, J. (2009). Impacts of climatic change on coffee flowering and fruit development in Veracruz, México. *Interciencia*, 34, 322-329.

- Vitousek, P. M., & Howarth, R. W. (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 13(2), 87-115. <https://doi.org/10.1007/BF00002772>.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2007). *Fundamental of biochemistry*. Médica Panamericana. <https://books.google.com.mx/books?id=FXDqLK6GmAC>.
- Wang, L., & D'Odorico, P. (2008). Decomposition and mineralization. En S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology* (pp. 838-844). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00263-9>.
- Wang, M., Shi, S., Lin, F., Hao, Z., Jiang, P., & Dai, G. (2012). Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of Manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in northeastern China. *PloS One*, 7(2), e30754-e30754. PubMed. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030754>.
- Ward, M. H. (2009). Too much of a good thing? nitrate from nitrogen fertilizers and cancer. *Reviews on environmental health*, 24(4), 357-363.
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *The nature and properties of soils*. (15th edition). Pearson Education.
- White, P., Dranke, M., & Hindle, P. (2012). *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. Springer US. <https://books.google.com.mx/books?id=WVraBwAAQBAJ>.
- Willson, C. (1985). Mineral nutrition and fertiliser needs. En M. N. Clifford & K. C. Willson (Eds.), *Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage* (pp. 135-156). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_6).
- Xiao, Z., Bai, X., Zhao, M., Luo, K., Zhou, H., Ma, G., Guo, T., Su, L., & Li, J. (2020). Soil organic carbon storage by shaded and unshaded coffee systems and its implications for climate change mitigation in China. *The Journal of Agricultural Science*, 158(8-9), 687-694. <https://doi.org/10.1017/S002185962100006X>.

## ANEXO I

### **Análisis foliar**

#### *Preparación de la muestra*

Las muestras vegetales se lavaron con ácido clorhídrico (HCl) al 3 %, agua destilada y agua corriente. Esto con la finalidad de eliminar cualquier partícula o material contaminante que pudiera estar adherida a la superficie de las hojas. Para la preparación del HCl al 3 % se tomó un matraz aforado de dos litros. En el matraz aforado de dos litros se agregaron dos litros de agua corriente y 60 mL de HCl. Posteriormente la solución líquida se aforo y se agito manualmente durante 30 segundos. Después la solución líquida se vació en una palangana rectangular de plástico. Posteriormente en otra palangana rectangular se adicionaron dos litros de agua destilada. En una tercera palangana se agregaron dos litros de agua corriente. Las muestras vegetales se lavaron primero en la palangana con HCl al 3 %. Posteriormente las muestras vegetales se lavaron en la palangana de agua destilada. Y finalmente las muestras vegetales se enjugaron en la palangana con agua corriente. Por último, las muestras vegetales fueron secadas con toallas de papel y se colocaron en bolsas de papel con sus respectivas etiquetas. A las bolsas de papel se les hicieron perforaciones con la finalidad de que las muestras vegetales se secan más rápido.

Las muestras vegetales se colocaron en una estufa con ventilador, a una temperatura de 70° C durante 48 horas. Transcurrido el tiempo las muestras se pulverizaron con un molino Wiley de acero inoxidable de forma manual. Las muestras que no quedaron bien pulverizadas se molieron en un mortero de porcelana y posteriormente se pasaron a un Molino SPEX CertiPrep de balines, donde se dejaron por cinco minutos. Posteriormente las muestras vegetales se colocaron en un sobre de papel con su respectiva etiqueta. En el sobre de papel, la muestra se homogenizó 50 veces mediante una espátula de acero inoxidable. Posteriormente la muestra se vació sobre un pedazo de papel Kraft y se dividió en cuatro cuadrantes. Se tomó un cuarto de la muestra vegetal y se pasó por un tamiz malla 40 (0.42 mm). Una vez tamizada la muestra se colocó en un sobre de papel para su análisis químico. Esto se repitió con todas las muestras vegetales.

### *Macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn)*

De la muestra vegetal, se pesó 0.5 g y se colocó en tubos de digestión Follin wu de 25 mL. Posteriormente la mezcla digestora se preparó con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ), relación 2:1. Del  $\text{HNO}_3$  65 % se midió un litro mediante una probeta de 1000 mL. Posteriormente el  $\text{HNO}_3$  se vació en un frasco de vidrio color ámbar de 2.5 L. Después del  $\text{HClO}_4$  70 % se midieron 500 mL mediante una probeta de 500 mL y se adicionaron al frasco que contenía el  $\text{HNO}_3$ . La mezcla de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HClO}_4$  se homogenizó manualmente durante 30 segundos. Posteriormente de la mezcla digestora se tomaron 100 mL y se añadieron a una bureta de 50 mL. Una vez contenida la mezcla digestora en la bureta, se fueron añadiendo 6 mL a cada tubo de digestión Follin wu. Posteriormente los tubos de digestión se colocaron en el block digestor. A cada tubo se le colocó un embudo de vidrio de 3 cm de diámetro, con la finalidad de evitar la acumulación del ácido en los ductos de ventilación de la campana extractora y así reducir los riesgos de explosión. El block digestor se puso a una temperatura de 150 ° C hasta que los vapores pardos del  $\text{HNO}_3$  desaparecieron. Este proceso tomó entre 30 y 45 minutos. Posteriormente, la temperatura del aparato digestor se elevó a 210 ° C. Esto con la finalidad de que la mezcla azeotrópica de  $\text{HClO}_4$  alcanzara el punto de ebullición. La reacción del  $\text{HClO}_4$  ocurrió con la aparición de vapores pardos leves y después por una reacción viciosa con formación de espuma. La reacción finalizó cuando aparecieron los vapores blancos densos característicos del  $\text{HClO}_4$ . Esta etapa duró aproximadamente una hora. Después de la aparición de vapores blancos, las muestras se dejaron en el aparato digestor durante cinco minutos. Posteriormente cada tubo de digestión Follin wu se aforo con agua desionizada. Y después el digestado se pasó a unos frascos de plástico de 25 mL. Posteriormente de cada muestra digestada se hicieron diluciones 1/10. Del digestado se tomó una alícuota de 1 mL mediante una micropipeta y se colocó en tubos de ensayo de 15 mL. A cada tubo de ensayo, se agregaron 9 mL de agua desionizada mediante un dispensador. Posteriormente el tubo de ensayo se agitó en un agitador vortex durante 30 segundos. Posteriormente de la dilución 1/10 se hicieron diluciones 1/10 + 1/10 y se repitieron los pasos descritos en la dilución 1/10.

Una vez agitadas las muestras se leyeron mediante espectrofotometría de absorción atómica mediante el espectrofotómetro SpectrAA 220FS. La cuantificación de K y Mg, se

leyó a una longitud de onda de 766 y 285 nm, respectivamente, en dilución 1/10 + 1/10. Mientras que la cuantificación de Ca y Na, se leyó a una longitud de onda de 422 y 589 nm, respectivamente, en dilución 1/10.

La cuantificación de micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) se leyó directamente en el extracto digerido (frascos de plástico de 25 mL) esto fue sin realizar ninguna dilución. El espectrofotómetro (SpectrAA 220FS) se calibró para leer a longitudes de onda de 324, 213, 279 y 248 nm para Cu, Zn, Mn y Fe respectivamente.

#### *Cuantificación de P total*

De cada muestra vegetal digestada, se tomó una alícuota de 5 mL y se colocó en un matraz aforado de 50 mL. Después del reactivo vanadomolibdico se tomaron 7.5 mL y se agregaron a cada matraz de 50 mL. Posteriormente el matraz aforado de 50 mL se aforo con agua destilada y se agito manualmente durante 30 segundos. Las muestras se dejaron en reposo durante 20 minutos. Transcurrido el tiempo, las muestras vegetales se leyeron en un espectrofotómetro UV-VIS DR5000 por absorción de luz por el complejo fosfovanadomolibdico a 470 nm. De una solución de P de 20 ppm se tomaron alícuotas de 5, 10, 15, 20 y 25 mL para la curva de calibración.

#### *Determinación de N y C total*

La muestra vegetal se tamizó malla 100 (0.15 mm). Las muestras se colocaron en una estufa Thomas Scientific, a una temperatura de 75° C durante dos horas. Transcurrido el tiempo las muestras se colocaron en un desecador durante una hora. Posteriormente de la muestra se pesaron 12 mg y se colocaron en cápsulas de estaño. Con unas pinzas de acero inoxidable se cerraron las cápsulas correctamente. Las cápsulas se colocaron en el automuestreador del equipo. Posteriormente las muestras se leyeron mediante un analizador automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific).

### **Análisis de hojarasca y horizonte de fermentación**

#### *Preparación de la muestra*

Las muestras de hojarasca y horizonte de fermentación se colocaron en una estufa con ventilador, a una temperatura de 70° C durante 48 horas. Transcurrido el tiempo las muestras se pulverizaron con un molino Wiley de acero inoxidable de forma manual. Las

muestras que no quedaron bien pulverizadas se molieron en un mortero de porcelana y posteriormente se pasaron a un Molino SPEX CertiPrep de balines, donde se dejaron durante cinco minutos. Una vez molidas las muestras, se colocaron en un sobre de papel con su respectiva etiqueta. En el sobre de papel, la muestra se homogenizó 50 veces mediante una espátula de acero inoxidable. Posteriormente la muestra se vació sobre un pedazo de papel Kraft y se dividió en cuatro cuadrantes. De la muestra se tomó un cuarto y se pasó por un tamiz malla 100 (0.15 mm). La muestra se colocó en un sobre de papel para su análisis químico. Esto se repitió con todas las muestras de hojarasca y horizonte de fermentación.

#### *Determinación de C y N total*

De la muestra tamizada se pesaron 12 mg y se colocaron en cápsulas de estaño, con unas pinzas de acero inoxidable se cerraron las cápsulas correctamente. Las cápsulas se colocaron en el automuestreador del equipo. Posteriormente las muestras se leyeron mediante un analizador automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific).

### **Análisis de suelos**

#### *Determinación de pH*

La muestra de suelo se tamizo malla 10 (2 mm). Posteriormente de la muestra se pesaron 10 g y se colocaron en un vaso de precipitado de plástico de 100 mL. Posteriormente a cada vaso de precipitado se añadieron 20 mL de agua destilada (relación suelo/solución 1:2). Después los vasos de precipitado se agitaron en un agitador mecánico a 180 rpm durante media hora. La suspensión del suelo se agitó antes de efectuar la lectura correspondiente de pH en el pH-metro.

#### *Determinación de materia orgánica del suelo*

La muestra de suelo se tamizo malla 30 (0.5 mm). De la muestra de suelo se pesaron 0.5 g y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Posteriormente del dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$  1 N) se tomaron 10 mL y se añadieron al matraz de 500 mL. Posteriormente la solución se agitó de manera manual durante 30 segundos. Después del  $H_2SO_4$  concentrado se tomaron 20 mL y se añadieron al matraz que contenía la muestra. La solución se agitó cuidadosamente durante 1 min y se dejó reposar durante 20 min. Transcurrido el tiempo, en el matraz con la muestra se añadieron 200 mL de

agua destilada. Posteriormente a cada matraz con la muestra se añadieron 10 mL del  $\text{H}_3\text{PO}_4$  mediante un dispensador automático. Después a cada matraz con la muestra se colocaron de 20 a 25 gotas del indicador de difenilamina. Finalmente, la muestra se tituló con  $\text{FeSO}_4$  0.5 N.

*Determinación de macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn)*

Para la determinación de macronutrientes, se pesó 1 g de pulpa de papel y se colocó en el fondo de una jeringa de plástico de 50mL a la cual se le separo previamente el émbolo. Se comprimió la pulpa con el extremo plano del émbolo. Se agregaron 5 g de suelo tamizado malla 10 (2mm). La jeringa se colocó en la parte superior del equipo de vacío y se conectó a través de una manguera plástica corta con otra jeringa con émbolo en estado inicial. Esta última se sujetó a la parte inferior del extractor. Se midieron 50 mL de acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) 1N pH 7 con una probeta y se vertió sobre la jeringa que contenía el suelo. Cuando el extractante fue succionado por la jeringa con embolo, se separó el juego de jeringas de su sujeción inferior al equipo y así con el resto de jeringas. Terminando lo anterior, se desconectó el extractor. La solución fue trasvasada a un matraz volumétrico de 100 mL. Se repitió la operación una segunda vez. Se aforo el matraz con la solución de  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1 N pH 7. Para la determinación de Ca, en general se tomaron alícuotas de 3 mL y se aforo con agua a 50 mL (dilución de volumen 50/3), se realizó otra dilución con alícuota de 3 mL y se aforo a 25 mL. Se leyó Ca en absorción atómica en llama  $\text{N}_2\text{O}$  con  $\text{C}_2\text{H}_2$  y en curvas de calibración diluidas en agua. Para la determinación de Mg, en general se leyó en la primera dilución. Se cuantifico con el equipo de absorción atómica en llama con  $\text{C}_2\text{H}_2$  y en curvas de calibración diluidas en agua. La cuantificación de K y Na se realizó en el equipo de absorción atómica en su modo de emisión, utilizando llama de aire con  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Para la determinación de K y Na en general se leyó en las diluciones 50/3 + 25/3 y 25/3, respectivamente. Se calibro el instrumento a 100 con el patrón más concentrado y a cero con  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  en caso de leer las muestras en el extracto concentrado o con agua si se han realizado diluciones. La serie de patrones y muestras se leyeron como mínimo dos veces para obtener una lectura constante.

Para la determinación de micronutrientes, de la muestra de suelo tamizada malla 10 (2 mm) se pesaron 10 g y se depositaron en un tubo de propileno de 100 mL. Posteriormente a cada tubo de propileno se agregaron 20 mL de la solución extractora (ácido dietilentriaminopentacético (DTPA) 0.005 M). Después los tubos de propileno se taparon con su respectivo tapón. Antes de colocar el tapón, se puso un pequeño plástico sobre el tubo para evitar contaminación. Posteriormente los tubos de propileno se agitaron mediante un agitador mecánico a 180 rpm durante dos horas. Finalmente, la muestra se filtró a través de papel Whatman 42. La cuantificación de Fe, Cu, Zn y Mn se hizo mediante espectrofotometría de absorción atómica mediante el espectrofotómetro SpectrAA 220FS y se utilizó llama aire con acetileno.

#### *Determinación de P-lábil método Bray y Kurtz II*

La muestra de suelo se tamizó malla 10 (2 mm). De la muestra de suelo se pesaron 2.5 g y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 50 mL. Posteriormente a cada matraz con la muestra se añadieron 20 mL de la solución extractante (ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N solución de fluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) 0.03 N). Cada matraz se agitó manualmente durante 40 segundos. Después la solución se filtró a través de papel filtro Whatman 40. El filtrado fue claro para su posterior análisis colorimétrico. Posteriormente del filtrado se tomó una alícuota de 2 mL y se agregaron a un tubo de ensayo de 20 mL. A cada matraz se agregaron 2 mL de la solución de molibdato de amonio y 5 mL de agua destilada. La solución se agitó manualmente durante 30 segundos. Posteriormente a la solución se agregó 1 mL de la solución diluida de stock de cloruro estanoso ( $\text{SnCl}_2$ ). La solución se dejó en reposo, después de 10 minutos, pero antes de 20 minutos se leyó en el espectrofotómetro a una intensidad de 660 nm. Se leyó a una curva de calibración conteniendo 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0  $\text{mg kg}^{-1}$  P.

#### *Determinación de la concentración de C y N total*

La muestra de suelo se tamizó malla 100 (0.15 mm). Las muestras se colocaron en una estufa Thomas Scientific, a una temperatura de 105° C durante dos horas. Transcurrido el tiempo las muestras se colocaron en un desecador durante una hora. Posteriormente de la muestra se pesaron 32 mg y se colocaron en cápsulas de estaño. Con unas pinzas de acero inoxidable se cerraron las cápsulas correctamente. Las cápsulas se colocaron

en el automuestreador del equipo. Posteriormente las muestras se leyeron mediante un analizador automatizado Flash 2000 (Thermo Scientific).

#### *Determinación de $\text{NO}_3^-$ y $\text{NH}_4^+$*

La muestra de suelo se tamizó malla 10 (2 mm). De la muestra se pesaron 5 g y se colocaron en tubos de polipropileno de 100 mL. Después a cada tubo se añadieron 50 mL de cloruro de potasio (KCl) 2 N. Después la solución se agitó a través de un agitador mecánico a 180 opm durante una hora. Transcurrido el tiempo, la solución se dejó reposar durante 60 minutos. Posteriormente la solución se filtró a través de papel filtro Whatman No. 42. Una vez filtrado la solución se guardó en el cuarto frío para su posterior análisis. Cuando se procedió a leer las muestras, a un matraz Erlenmeyer de 125 mL se añadieron 10 mL de la mezcla ácido bórico con indicador ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ). Posteriormente el matraz se colocó debajo del tubo de salida del condensador del aparato de destilación de manera que hubiera una distancia de 4 cm, entre este tubo de salida y la superficie del líquido en el frasco Erlenmeyer. Del extracto filtrado, se pipeteo una alícuota de 10 mL y se añadió a un matraz de destilación. Se conecto el aparato de destilación y al matraz con el extracto de la muestra se agregaron 0.2 g de óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) calcinado. Se conecta el aparato de destilación y se recogieron aproximadamente 50 mL. En esta primera fase se destilo el  $\text{NH}_4^+$ .

Después al matraz de destilación que contenía el residuo de destilación de  $\text{NH}_4^+$ , se adicionó 0.2 g de aleación de Devarda y se destilo recibiendo el destilado en otro matraz Erlenmeyer de 125 mL, que contuviera 10 mL de la mezcla  $\text{H}_3\text{BO}_3$ -indicador, hasta obtener 50 mL del destilado. En esta segunda fase se destilo el  $\text{NO}_3^-$ . El  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  destilados se titularon con ácido sulfúrico 0.005 N.

#### *Determinación de contenido de humedad*

El crisol se taro a peso constante en una balanza analítica. De la muestra de suelo se agregaron 5 g al crisol y se pesó nuevamente. Una vez pesada la muestra, el crisol se colocó en una estufa de secado a 105 °C durante 24 horas, hasta obtener peso constante de la muestra. Cuando la muestra de suelo alcanzo peso constante, se puso el crisol con el suelo en un desecador por 30 minutos y se pesó. Se repitió el procedimiento por triplicado.