



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

DINÁMICA DE CARBONO, NITRÓGENO Y SU CONTRIBUCIÓN A LA MULTIFUNCIONALIDAD EN EL SISTEMA DE CAFÉ – AGUACATE, VERACRUZ - MÉXICO

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

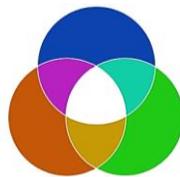
DIANA AYALA MONTEJO

Bajo la supervisión de:

DR. EDUARDO VALDÉS VELARDE



APROBADA



Doctorado en Ciencias en
AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Sociedad Economía Ambiente

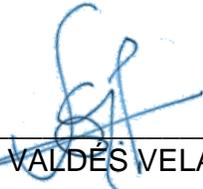
Chapingo, Estado de México, 17 de mayo de 2021

**DINÁMICA DE CARBONO, NITRÓGENO Y SU CONTRIBUCIÓN A LA
MULTIFUNCIONALIDAD EN EL SISTEMA DE CAFÉ – AGUACATE,
VERACRUZ – MÉXICO**

Tesis realizada por **DIANA AYALA MONTEJO** bajo la supervisión del comité Asesor indicando, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR: _____


Dr. EDUARDO VALDÉS VELARADE

ASESOR: _____


Dr. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR: _____


Dr. JOEL PÉREZ NIETO

ASESOR: _____


Dr. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

LECTOR
EXTERNO: _____


Dr. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS USADAS.....	VIII
RESUMEN GENERAL.....	XIII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN MÉXICO	5
RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MATERIALES Y MÉTODOS	7
3. HALLAZGOS PRINCIPALES	8
3.1. La dinámica de carbono y nitrógeno y los ciclos biogeoquímicos	10
3.2. Emisiones de gases de efecto invernadero en SAF de café	14
3.3. Potencial de los sistemas agroforestales con café en México y su relación con la dinámica de carbono y nitrógeno	14
3.4. Los factores económicos y sociales de los sistemas agroforestales con café y su influencia en la dinámica de carbono y nitrógeno	15
3.5. Alcances y limitaciones de los SAF de café en México	17
3.6. Las necesidades de investigación en la dinámica de C y N en los SAF	18
4. CONCLUSIÓN.....	18
5. LITERATURA CITADA	19
CAPÍTULO III. FACTORES SOCIO-ECONÓMICOS, EL MANEJO AGRONÓMICO Y LOS ALMACENES DE CARBONO - NITRÓGENO EN EL SISTEMA AGUACATE-CAFÉ.....	27
RESUMEN	27
1. INTRODUCCIÓN.....	28
2. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.1. Área de estudio	29
2.2. Diseño de muestra	29
2.3. Variables socioeconómicas y de manejo analizadas en los sistemas agroforestales	30
2.4. Determinaciones de carbono y nitrógeno.....	33
2.5. Análisis de información	34
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
3.1. Variables económicas, sociales y de manejo, en los sistemas.....	34
3.2. Contenidos de carbono y nitrógeno en los sistemas	36
3.3. Relación entre las variables económicas y de productividad, y el manejo agronómico.....	36
3.4. Relación entre las variables sociales y el manejo agronómico	38
3.5. Relación entre los contenidos de C, N, y las variables de manejo agronómico	38

4. CONCLUSIONES.....	39
5. LITERATURA CITADA	40
CAPÍTULO IV. VARIACIÓN DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO Y LA DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO EN SISTEMAS AGRFORESTALES MODIFICADOS EN VERACRUZ, MÉXICO.....	
RESUMEN	44
1. INTRODUCCIÓN.....	45
2. MATERIALES Y MÉTODOS	46
2.1. Área de estudio	46
2.2. Descripción de los sistemas estudiados.....	47
2.3. Diseño experimental	48
2.4. Determinaciones de la respiración del suelo (RS).....	48
2.5. Determinación de la macrofauna del suelo	49
2.6. Determinación de la dinámica de carbono y nitrógeno	49
2.7. Análisis estadístico.....	50
3. RESULTADOS.....	51
3.1. Actividad biológica	51
3.1.1. Respiración en los residuos vegetales.....	51
3.1.2. Respiración en el suelo	51
3.2. Dinámica de carbono y nitrógeno	52
3.2.1. Carbono orgánico y nitrógeno total en el suelo.....	52
3.2.2. Contenido de carbono y nitrógeno en la biomasa vegetal	52
4. DISCUSIÓN.....	54
4.1. La actividad biológica del suelo	54
4.2. Dinámica del nitrógeno y calidad de la materia orgánica del suelo.....	55
4.3. El impacto de la actividad biológica del suelo en la dinámica de C y N de los sistemas...	56
5. CONCLUSIÓN.....	61
6. LITERATURA CITADA	61
CAPÍTULO V. MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DEL AGUACATE EN LA SUCESIÓN DE ESPECIES Y EL AUMENTO DE TEMPERATURA EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ.....	
RESUMEN	66
1. INTRODUCCIÓN.....	67
1.1. Este modelo basado en biomasa permitirá identificar los procesos que afectan los contenidos de carbono en los sistemas agroforestales con café.....	68
1.2. La simulación basada en biomasa es sensible a los diferentes patrones de sucesión manejados en los sistemas agroforestales con aguacate y café comparados con los SAF de café tradicionales	68
1.3. Efecto del cambio de temperatura en el C y N de los SAF	69
2. MATERIALES Y MÉTODOS	69
2.1. Área de estudio	69
2.3. Diseño experimental	71
2.4. Método de campo y laboratorio.....	71

2.5. Modelación	71
3. RESULTADOS.....	73
3.1. Mediciones de carbono en biomasa y suelo, basadas en determinaciones con muestras de campo.....	73
3.2. Mediciones de nitrógeno en suelo y la relación C/N, basadas en determinaciones con muestras de campo.....	73
3.3. Salidas del modelo.....	74
4. DISCUSIÓN.....	76
4.1. Procesos que afectan la variación de C y N en los SAF con café.....	76
4.2. Sensibilidad del modelo ante los cambios en la sucesión de especies de los SAF	77
4.3. Efecto del aumento de la temperatura en las concentraciones de C y N de los SAF	78
5. CONCLUSIÓN	79
6. LITERATURA CITADA	80
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES ASOCIADOS AL CAFÉ Y AGUACATE: UNA CONTRIBUCIÓN A LA MULTIFUNCIONALIDAD	82
RESUMEN	82
1. INTRODUCCIÓN	83
2. MATERIALES Y MÉTODOS	85
2.1. Área de estudio y descripción de variables a analizar	85
2.2. Metodología para análisis del escenario multicriterio	87
2.3. Metodología para análisis del escenario financiero	88
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
3.1. Priorización de los criterios en los sistemas agroforestales para cada tipo de escenario ..	88
3.2. Clasificación de los sistemas agroforestales con el método PROMETHEE	89
3.3. Sensibilidad de la clasificación con el método PROMETHE	92
3.4. La contribución de escenario multicriterio a la valorización de la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales.....	94
4. CONCLUSIÓN	94
5. LITERATURA CITADA	95
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES GENERALES	100
CAPÍTULO VIII. ANEXOS	103

Lista de Cuadros

Cuadros de Capítulo II

Cuadro 1. Clasificación de las publicaciones por temática.	9
--	---

Cuadros de capítulo III

Cuadro1 a. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo I	31
Cuadro1 b. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo II	322
Cuadro1 c. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo III	333
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de cada tipo de vegetación arbórea, cafetos y aguacate.....	34
Cuadro 3. Variables económicas y de productividad en los cuatro sistemas estudiados.....	35
Cuadro 4. Variables sociales en los cuatro sistemas estudiados.....	35
Cuadro 5. Variables de manejo agronómico en los cuatro sistemas estudiados.....	36
Cuadro 6. Contenidos de carbono y nitrógeno en Mg ha ⁻¹ por sistema en biomasa vegetal y suelo.....	36

Cuadros de Capítulo IV

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas usadas para determinar la biomasa de cada una de las especies de vegetación arbórea o arbustiva.....	50
Cuadro 2. Respiración en la capa <i>L</i> y <i>F</i> (residuos orgánicos) y del suelo (kg CO ₂ ha ⁻¹ h ⁻¹) en tres profundidades.....	51
Cuadro 3. Biomasa de la macrofauna del suelo (Mg DM ha ⁻¹) por tipo de sistema.....	52
Cuadro 4. carbono orgánico del suelo (Mg C ha ⁻¹) y nitrógeno total del suelo (Mg N ha ⁻¹), en tres profundidades.....	52
Cuadro 5. Carbono (Mg C ha ⁻¹) y Nitrógeno (Mg N ha ⁻¹) en hojarasca (capa <i>L</i>), mantillo (capa <i>F</i>).....	53
Cuadro 6. Carbono en la biomasa de las plantas de los sistemas (Mg C ha ⁻¹).....	53
Cuadro 7. Relación Carbono/Nitrógeno en hojarasca (capa <i>L</i>), mantillo (capa <i>F</i>) y suelo en las tres profundidades.....	54
Cuadro 8a. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidad) y las variables evaluadas (continúa)	56
Cuadro 8 b. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidades) y las variables evaluadas (continúa)	58
Cuadro 8 c. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidades) y las variables evaluadas (concluye)	59

Cuadros de Capítulo V

Cuadro 1. Carbono en biomasa vegetal y suelo, en Mg C ha ⁻¹	73
Cuadro 2. Nitrógeno total del suelo in Mg C ha ⁻¹ y relación C/N en el suelo.....	73

Cuadros de Capítulo VI

Cuadro 1. Metodologías para determinar los valores de los criterios	86
Cuadro 2. Matriz de desempeños de los sistemas en cada criterio	89
Cuadro 3. Flujos unicriterio netos	90
Cuadro 4. Clasificación de los escenarios financiero y multicriterio	90
Cuadro 5. Sensibilidad de la clasificación resultante del método PROMETHEE	93

Lista de Figuras

Figuras del capítulo II

Figura 1. Distribución de las palabras más frecuentes en las publicaciones y documentos relacionados a las temáticas de estudio.....	8
Figura 2. Diagrama de análisis de conglomerados de los temas analizados.....	10
Figura 3. Porcentaje de publicaciones por temática en función de las 54 publicaciones seleccionadas.....	10
Figura 4. Análisis de relación en los temas: dinámica de carbono en sistemas agroforestales con café y dinámica de nitrógeno en sistemas agroforestales con café...	12

Figuras del capítulo III

Figura 1. Análisis de componentes principales (ACP). a) Variables económicas y de productividad; b) Variables sociales.....	37
Figura 2. Análisis de componentes principales. (a) variables de manejo agronómico y carbono (b) variables de manejo agronómico y nitrógeno.....	39

Figuras del capítulo IV

Figura 1. Análisis de componentes principales (ACP).....	60
---	----

Figuras del capítulo V

Figura 1. Carbón en suelos y biomasa vegetal por sistema en Mg C ha ⁻¹	74
Figura 2. Nitrógeno en suelos y biomasa vegetal por sistema en Mg N ha ⁻¹	74
Figura 3. Variación del carbono en el suelo y la biomasa vegetal, en los sistemas agroforestales con el incremento de la temperatura.....	75
Figura 4. Variación del nitrógeno en el suelo y biomasa vegetal, en cada sistema agroforestal con el incremento de la temperatura.....	75
Figura 5. CO ₂ por respiración biológica en el proceso de descomposición (g m ⁻² año ⁻¹) y N total acumulado por el proceso de mineralización en todos los compartimentos (g m ⁻² año ⁻¹).....	76

Figuras del capítulo VI

Figura 1. Función de preferencia usual (Brans and De Simet, 2016).....	87
Figura 2. Clasificación de los sistemas incluyendo aportes de los criterios.....	91

Lista de abreviaturas usadas

BMS: Biomasa de macrofauna del suelo

C: Carbono

CBv: Carbono en biomasa vegetal

C/N: Relación carbono nitrógeno

COS: Carbono orgánico del suelo

DMS: Diversidad de macrofauna del suelo

G: Gestión

MOS: Materia orgánica del suelo

N: Nitrógeno

NBv: Nitrógeno en biomasa vegetal

NI: Necesidad de inversión

NTS: Nitrógeno total del suelo

RBC: Relación beneficio costo

SAF: Sistema agroforestal

SAFC: Sistema agroforestal con café

SCR: Sistema agroforestal de café con renovación

SCP: Sistema agroforestal de café con podas y limpieza severa

SCA: Sistema agroforestal de café asociado con aguacate

SMA: Sistema con monocultivo de aguacate

Dedicatoria:

Esta tesis se la dedico a mi esposo Gabriel, mis padres, hermanos, mi abuelita Herminia y toda mi familia por el apoyo para dejar que la distancia tenga un motivo: “Ganar con esfuerzo y pasión el conocimiento para el desarrollo personal y de los que nos rodean; con Mente Positiva y Espíritu Emprendedor pronto aplicaré lo aprendido involucrando las fortalezas de cada uno de ustedes”

Agradecimientos

Especial agradecimiento al Sr. Luis Alvarado, productor de aguacate y café, quien compartió sus experiencias y contribuyó a que este trabajo corresponda a una “*investigación aplicada*”.

A Don José Peralta productor de café quien colaboró con información para la presente investigación.

A Don Juan José y el Sr. Melquiades quienes aportaron sus conocimientos de la producción de café en Huatusco, Veracruz, México y fueron el enlace con los demás productores para realizar los experimentos.

Agradezco a mi director de tesis Dr. Eduardo Valdés Velarde y a los asesores: Dr. Esteban Escamilla Prado, Dr. Joel Pérez Nieto y Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas, por sus aportes y paciencia para guiar el desarrollar toda la investigación.

Al Dr. Edmundo Arturo Pérez Godínez por su motivación y apoyo, con lo cual se logró trabajar en el Laboratorio de Microbiología del Departamento de Agroecología de la UACH.

Al Dr. Juan Antonio Cruz Rodríguez por su apoyo incondicional que permitió poner en marcha diversos protocolos en el Laboratorio de Microbiología del Departamento de Agroecología de la UACH.

Al grupo de trabajo del Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas del Laboratorio de Geomática del Departamento de Suelos, quienes permitieron que ponga en marcha el quipo analizador de carbono, en el cual realicé las determinaciones de carbono y nitrógeno.

Al Dr. Rufo Sánchez Hernández por su motivación y sus grandes consejos para desarrollar los capítulos de la presente investigación. Sus consejos de edición y críticas de revisor han contribuido enormemente en esta investigación.

Al Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro por su apoyo incondicional y consejos para llevar a cabo parte de esta investigación en el COLPOS. Gracias por el acompañamiento constante y paciencia para guiarme en el proceso de toma de decisiones tanto académicas como personales.

Al Dr. Sergio Gerardo Benedicto Valdés por su gran apoyo en la estructuración de los experimentos en el laboratorio de física de suelos del COLPOS, así como su motivación y participación en el desarrollo de diversos artículos. Gracias por

compartir sus experiencias y siempre alentarme, es grato trabajar con usted y sus consejos han hecho que logre tejer sinergias con grandes investigadores a nivel mundial, sé que este es el primer paso de grandes proyectos que con su tutoría darán grandes aportes.

Al Dr. Juan Fernando Gallardo Lancho por su asesoramiento y apoyo crítico en la construcción y discusión de los capítulos referidos a carbono en el suelo.

Al Dr. Julio Baca del Moral por su asesoramiento, el cual contribuyó a mejorar mi nivel crítico en los proyectos de investigación y en las etapas de discusión de los artículos científicos. Además, su paciencia, motivación, atenciones y consejos permitieron expresar las experiencias aprendidas en diversos grupos de posgrado de la UACH y contar con apoyo externo de otras instituciones.

Al Dr. José Luis Romo Lozano por su tutoría en el uso de programas para análisis multicriterio. Muchas gracias por compartir la elaboración de un artículo científico, su disposición y motivación para discutir y construir el artículo, permitieron que ponga en práctica otro estilo de redacción científica y ampliar mis conocimientos en las metodologías de análisis multicriterio.

A la Dra. Ann Russell por su paciencia, motivación y asesoramiento para lograr modelar la sucesión de especies y el incremento de la temperatura, de los sistemas agroforestales con café, en el modelo CENTURY 4.5. Además, su asesoramiento me permitió mejorar la redacción científica en idioma inglés, logrando la elaboración de un artículo científico bajo su tutoría y participación.

A mis asesores peruanos Dr. Julio César Alegre Orihuela y Mg. Sc. Luis Alberto Arévalo López, quienes me aconsejaron y motivaron durante todo el periodo del doctorado. Sus consejos fueron cruciales para plasmar las lecciones aprendidas y las problemáticas globales en esta investigación, con el fin de replicar diversas metodologías y experiencias en diversos sistemas y atender la demanda de investigaciones aplicadas.

Finalmente agradezco a Anita, Angie y Rogelio, personal administrativo de la Coordinación de Posgrado de Fitotecnia, cuyas atenciones y afecto permitieron que me sienta apoyada y en un buen ambiente para expresar los detalles cotidianos que involucran los avances de las calificaciones, investigación y exámenes. Ellos hicieron que mi experiencia en el doctorado fuera acogedora.

Datos bibliográficos

Datos personales

Nombre	Diana Ayala Montejo
Fecha de nacimiento	12 de diciembre de 1985
Lugar de nacimiento	Talara, Pariñas, Piura, Perú
Pasaporte	116470050
CURP	AAMD851212MNEYNN07

Desarrollo académico

Pregrado	Ciencias Forestales
Título	Ingeniero Forestal
Maestría	Suelos

RESUMEN GENERAL

Dinámica de carbono, nitrógeno y su contribución a la multifuncionalidad en el sistema de café – aguacate, Veracruz – México

Los sistemas agroforestales (SAF) son importantes para conservar las reservas de carbono (C) y nitrógeno (N). En México los SAF con café (SAFC) han sido impactados por la roya, cuya proliferación se atribuye a las variaciones climáticas, la cual afecta la producción, tipos de manejo agronómico (MA) y condiciones socioeconómicas. Estas variaciones han propiciado el cambio de cultivo de café a aguacate, amenazando la permanencia de los cafetales en Huatusco, Veracruz. El objetivo fue analizar el efecto de la asociación de café- aguacate en la dinámica de C y N, y en su multifuncionalidad. Para ello se compararon cuatro sistemas: SAFC renovado (SCR); SAFC, limpieza y poda severa (SCP); sistema de aguacate – café (SAC); monocultivo de aguacate (SMA), cuyo análisis de 56 variables socioeconómicas identificó que SAC fue sensible a la diversidad de mercado, insumos esporádicos, acceso a educación, incorporación de material orgánico externo, variables que explicaron las variaciones en el MA y en la dinámica de C y N del suelo. Se comparó la actividad biológica del suelo, cuyos resultados demostraron que la introducción de aguacate en SAFC generó variaciones en la respiración del suelo y afectó de manera positiva a los contenidos de C y N del suelo. La introducción de aguacate en la sucesión de especies y el efecto del incremento de temperatura del ambiente, analizados con el modelo CENTURY demostró que el potencial del SCA para almacenar C y N depende de la introducción de aguacate y del tipo de MA con producción de aguacate y café de manera simultánea, pero presentó menor capacidad para contrarrestar los efectos de la temperatura comparado con el SCR. El análisis integrado de los criterios económicos, sociales y ambientales con el método PROMETHEE evidenció la importancia de la multifuncionalidad del SAC para conservar los cafetales ante la amenaza de SMA.

Palabras clave: sistemas agroforestales, socioeconomía, CENTURY, PROMETHEE

Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible,
Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Diana Ayala Montejo

Director de Tesis: Dr. Eduardo Valdés Velarde

GENERAL ABSTRACT

Carbon and nitrogen dynamics and their contribution to the multifunctionality in the coffee-avocado system, Veracruz – Mexico

Agroforestry systems (AFS) are important to conserve carbon (C) and nitrogen (N) reserves. In México, coffee AFS (CAFS) have been impacted by rust, whose proliferation is attributed to climatic variations, which affecting production, types of agronomic management (AM) and socioeconomic conditions. These variations have led to cultivation change from coffee to avocado, threatening the permanence of coffee plantations in Huatusco, Veracruz. The objective was to analyze the effect of the coffee-avocado association in the dynamics of C and N, and in its multifunctionality. For this, four agroforestry systems were compared: CAFS renewed (RCAFS); severe cleaning and pruning (CSP); avocado-coffee system (CAS); avocado monoculture (AMS); which were analyzed with 56 socioeconomic variables to identify that ACS was sensitive to market diversity, sporadic inputs, access to education, incorporation of external organic material, which explained the variations in the AM and in the dynamics of C and N from the soil. The biological activity of the soil was compared, and the results showed that the introduction of avocado in CAFS generated variations in soil respiration and positively affected the C and N contents of the soil. The introduction of avocado in the succession of species and the effect of the increase in environment temperature were analyzed with the CENTURY model, showing that the potential of CAS to store C and N depends on the introduction of avocado and the type of MA for the production of avocado and coffee simultaneously, but presented a lower capacity to counteract the effects of temperature compared to the RCS. The integrated analysis of economic, social and environmental criteria with the PROMETHEE method showed the importance of the multifunctionality of the CAS to conserve coffee plantations in the face of the AMS threat.

Key Word: Agroforestry systems, socioeconomic, CENTURY, PROMETHEE.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

En Veracruz los sistemas agroforestales con café han posicionado a esta región como la segunda productora de grano después de Chiapas, con una superficie de 144 000 hectáreas y 86 000 productores; en la región este tipo de sistemas tienen importancia económica, social, cultural y ambiental (Escamilla, Díaz y Castillo, 2017) y se manejan bajo policultivos tradicionales de café (Bautista, Gutiérrez, Ordaz, 2018). Esta clasificación según Escamilla, Licona, Díaz, *et al.* (1994) se debe a que el cultivo de café se maneja con una alta diversidad de especies de árboles de sombra, arbustivos, tanto nativos como introducidos, y otras plantas, que genera un sistema complejo con alta diversidad florística, proveen alimentos, medicina y materias primas, que son útiles para la subsistencia local. Además, son reconocidos por su potencial para almacenar entre 132 y 188 Mg C ha⁻¹ (Masuhara, Valdés, Pérez, *et al.*, 2015), valores que se atribuyen a la riqueza de su composición florística (Sánchez *et al.*, 2017).

A partir del año 2012 la productividad de los sistemas agroforestales con café en México disminuyó debido a problemas fitosanitarios, tales como la roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), ocasionados por las variaciones climáticas, pues el aumento de la temperatura en un grado Celsius, afecta a los procesos biológicos como la retención o caída de hojas, variaciones en las fechas de floración, fructificación y cosecha, el aumento de plagas, hongos y enfermedades (Granados, Medina y Peña, 2014).

Para contrarrestar los efectos ocasionados por las variaciones de la temperatura los productores de la región buscaron alternativas para solucionar la productividad en sus sistemas agroforestales. Estas alternativas son: (1) renovar los cafetales; (2) realizar limpiezas y podas severas; (3) introducir aguacate; (4) optar por cambiar totalmente a un monocultivo de aguacate; estas alternativas corresponden a cuatro tipos de sistemas, los cuales fueron comparados y analizados durante toda la investigación.

La alternativa por el cambio del sistema agroforestal con café a monocultivo de aguacate fue alentada porque las condiciones edafoclimáticas y ecotopográficas de Veracruz permiten el desarrollo de aguacate (Galindo *et al.*, 2011), además de ser un cultivo con alto valor comercial a nivel nacional e internacional (Sánchez-Hernández, Escamilla-Prado, Mendoza-Brasiño *et al.*, 2018). Por lo que los sistemas agroforestales con café han sido desplazados por monocultivos de aguacate; esta decisión podría modificar los factores económicos y sociales del productor, y por tanto, influir en el manejo agronómico de los sistemas que generarían variaciones en el aporte de residuos orgánicos e insumos para fertilizar, los cuales pueden afectar a los almacenes de carbono, los procesos de mineralización del nitrógeno (Wicke, Smeets, Razzaque *et al.*, 2013) y generar alteraciones en los ciclos biogeoquímicos.

Estas alternativas corresponden a los sistemas que se compararon durante toda la investigación, considerando a un monocultivo de aguacate como tratamiento testigo, cuyas características se describen a continuación:

- **Sistema agroforestal de café renovado (SCR).** Este sistema es manejado con 4 000 plantas de café ha⁻¹, con una altura y diámetro promedio de 0.65 y 0.013 m, respectivamente, y 60 árboles de sombra por ha⁻¹, estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp, *Inga* spp y *Grevillea robusta*, con una altura y diámetro promedio de 12.27 y 0.0985 m, respectivamente. La fertilización se realiza con 5 Kg de composta (materia seca) por planta de café, esta composta es previamente enriquecido con residuos de pulpa de café en una proporción de 100 kg de pulpa por tonelada de composta. Se aplica 8 toneladas de cal agrícola ha⁻¹ cada tres años, antes de la renovación y desde hace 10 años. El sistema tiene 21 años de edad sin agregar agroquímico y no realiza control de plagas y enfermedades. El control de arvenses se realiza manualmente con azadón.
- **Sistema agroforestal de café con podas intensivas (SCP).** Este sistema es manejado con 2 400 plantas de café ha⁻¹, con una altura y diámetro promedio de 2.85 y 0.0251 m, respectivamente, y 40 árboles de sombra por ha⁻¹, estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp and *Inga* spp., con una altura y diámetro promedio de 11.89 y 0.253 m, respectivamente. La fertilización se realiza anualmente con 5 Kg de vermicomposta (materia seca) por planta de café. Está vermicomposta es enriquecida con residuos de la pulpa de café en una proporción 10:1. Se aplica 1 Kg de cal agrícola por planta de café. La densidad de sombra es controlada con podas severas, no se realiza control de plagas y enfermedades, y el control de arvenses es semi-mecanizado. El sistema fue instalado hace 21 años.
- **Sistema agroforestal de café con introducción de aguacate (SCA).** Este sistema es manejado con 1 800 plantas de café y 100 plantas de aguacate ha⁻¹, con cinco árboles de sombra intercalados de diversas especies por ha⁻¹. Lo árboles de aguacate tiene una altura y diámetro promedio de 11.7 cm y 3 m, respectivamente, y las plantas de café, 1 cm y 1.6 m, respectivamente. La fertilización consiste en aplicar vermicomposta y micorrizas (un kg de micorrizas por 500 kg de vermicomposta), está es aplicada a una dosis de 15 kg (materia seca) por planta de aguacate y cinco kg (materia seca) por planta de café, anualmente. Adicionalmente, se incorpora “microorganismos eficientes” (ME), este producto contiene 4.2 % de ácidos húmicos y 0.5 % de ácidos fúlvicos, los cuales contienen: 1.3 % N; 1.2 % P; 2.4 % K; 2.2 % de Ca; 1.7 % Mg; 0.02 % Mn; y 0.02 % B (información de fabricante). Estos ME son aplicados a nivel foliar, mensualmente, en dosificaciones de un litro de ME por 200 litros de agua (esté volumen abastece a 50 plantas de aguacate y 900 cafetos); cuya acción es brindar nitrato a través del sistema vascular para lograr una mejor asimilación de nutrientes. El control de plagas y enfermedades se realiza con trampas de luz nocturna, trampas amarillas y aplicaciones de fungicida compuesto por Cu y Cal hidratada en dosis de

un kg de cada uno en 100 L de agua (para 100 plantas de aguacate), las aplicaciones se realizan una vez al mes; para el caso de cafetos no se aplican pesticidas. El control de arvenses es mecanizado con desbrozadora. El sistema tiene 8 años de instalado.

- **Monocultivo de aguacate (SMA).** Este sistema se consideró como testigo, está conformado por 210 plantas de aguacate por ha⁻¹, las plantas tienen una altura y diámetro promedio de 3 m y 18.5 cm, respectivamente. La fertilización se realiza con agroquímicos que contienen N:P:K (17:17:17) y urea, se aplica 1.4 Kg de cada producto por planta, tres veces por año. Para el control de plagas y enfermedades se aplicó *RIDONIL* (Metalaxy Mancozel (64%) + metalaxil-M (4%)) y *Thiametoxan + Lambdacialotrina (ENGEO)*, una dosis de 250 ml L⁻¹ cada trimestre. El control de arvenses es con desbrozadora (mecanizado). El sistema tiene 8 años de establecido.

Para comparar y analizar los sistemas se plantearon cinco capítulos, los cuales tuvieron los objetivos siguientes:

- (1) Justificar e identificar las áreas con necesidad de investigación sobre carbono y nitrógeno en SAF con café en México, a manera de capítulo del estado de conocimiento o revisión de literatura, con el fin de evidenciar la importancia de realizar un análisis integrado del potencial de los SAF para almacenar carbono, la importancia de su diversificación y sus funciones socioeconómicas, considerando los últimos avances de investigación en México hasta el año 2018. Este capítulo permitió estructurar los siguientes cuatro capítulos de acuerdo con la demanda de investigaciones detectadas.
- (2) Identificar las variables socioeconómicas que modifican las características del manejo agronómico del sistema de producción aguacate-café y que repercuten en el almacenamiento de C y N de los compartimientos de biomasa vegetal y suelo. Este capítulo atendió la demanda de investigación relacionada con la importancia de la diversificación productiva, y consistió en analizar 56 variables socioeconómicas con un análisis de componentes principales de tres componentes. Este análisis identificó que cinco variables sociales explican 50.16% de variación del manejo agronómico y cuatro variables económicas el 50.85%. El manejo agronómico modificó el contenido de nitrógeno total del suelo porque impacta directamente en la intensidad del reciclaje de residuos orgánicos dentro del sistema. Se detectó que el Sistema café aguacate fue sensible a la inversión en insumos esporádicos, diversidad de mercado, acceso a recursos de educación, incorporación de material orgánico externo, y por tanto explican las variaciones en el manejo agronómico y en la dinámica de nitrógeno total del suelo y el carbono orgánico del suelo. Las variables priorizadas en el análisis permitieron comprender el comportamiento de la introducción de aguacate en el siguiente capítulo.

- (3) Analizar la variación de la actividad biológica del suelo y su impacto en la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café modificados con la introducción de aguacate, con el fin de comparar las emisiones de CO₂ emitidas por la respiración del suelo y la macrofauna del suelo, generadas por la actividad biológica del suelo y su repercusión en los contenidos de carbono y nitrógeno en los diferentes compartimientos, comparados con los demás sistemas y el monocultivo de aguacate. Estos resultados se utilizaron como línea base para realizar la modelación del efecto de la temperatura en los sistemas en el capítulo siguiente.
- (4) Evaluar el efecto del aguacate en la sucesión de especies y el aumento de temperatura en los sistemas agroforestales de café, para ello se utilizó el modelo CENTURY, con el fin de modelar el efecto de la introducción de aguacate en los almacenes de carbono y el ciclo del nitrógeno; lo cual permitió comprender qué procesos son sensibles a la modificación de los sistemas agroforestales con café y cómo afecta a los ciclos biogeoquímicos de carbono y nitrógeno; así como la identificación de los factores que influyen en cada sistema para contrarrestar los efectos del incremento de la temperatura. Para este objetivo se compararon los cuatro sistemas con los bosques mesófilo de montaña, cuya data recopiló información de literatura de estudios realizados en Veracruz, como segundo testigo para parametrizar el crecimiento de la vegetación en el modelo.
- (5) Analizar y priorizar los cuatro sistemas evaluados, mediante dos escenarios: multicriterio (EMC) y financiero (EF), con información de los ciclos productivos 2017 -2018, 2018-2019 y 2019-2020, para evidenciar la amenaza del desplazamiento de los cafetales tradicionales por el cultivo de aguacate y la importancia de usar modelos que permitan integrar múltiples criterios con inclusión de variables que contribuyan a valorar la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales. Este capítulo de conclusión demostró que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

El análisis de todos los capítulos se presenta a modo de artículos científicos con el fin de que las conclusiones de cada artículo justifiquen y articulen una estructura consecuente para los subsiguientes capítulos, los cuales se desarrollan en el presente documento.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN MÉXICO

Resumen

La relación con la dinámica del carbono y nitrógeno, los problemas ambientales que impactan en las funciones socioeconómicas de los sistemas agroforestales con café en México, y la importancia de su diversidad florística, aún no han sido analizados de manera integrada. El objetivo fue identificar las áreas con necesidad de investigación sobre la dinámica de carbono y nitrógeno en los sistemas agroforestales de café en México. Para ello se recopilaron publicaciones hasta el año 2018. Ésta información fue organizada y se realizó un análisis de conglomerados con el programa NVivo12, que permitió evaluar la frecuencia de investigaciones, identificar las temáticas relacionadas con la dinámica de carbono y nitrógeno, y la relación entre estos temas. El 43% de publicaciones está relacionada con almacenamiento de carbono y el 13% sobre la dinámica de nitrógeno, mientras que el 37 y 35% evidenciaron su importancia ambiental y capacidad de adaptación ante las variaciones climáticas, respectivamente. Las características socioeconómicas evidencian que existe una diversidad productiva, una composición florística en multiestratos y un manejo tradicional, que afectan la dinámica de carbono y nitrógeno, puesto que la calidad de materia orgánica depende de la diversidad de la composición florística del sistema y el tipo de manejo que aplique el productor. El presente análisis evidencia que las investigaciones se deben enfocar en: (1) la diversificación productiva y la dinámica de carbono y nitrógeno; (2) el efecto de las variaciones socioeconómicas en la dinámica de carbono y nitrógeno; (3) el grado de sensibilidad de la dinámica de carbono y nitrógeno ante las variaciones climáticas; (4) identificar qué capacidades de adaptación permiten mantener la dinámica de carbono y nitrógeno.

Palabras clave: Ciclos biogeoquímico, emisiones de gases de efecto invernadero, cambio climático, capacidad de adaptación, diversificación productiva.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Diana Ayala Montejo

Director de Tesis: Dr. Eduardo Valdés Velarde

Publicado en: Tropical and Subtropical Agroecosystems 23 (3) #99. Submitted July 3, 2020 – Accepted August 23, 2020. Doi:

1. Introducción

A nivel mundial, México es uno de los 13 países con mayores emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones netas totales anuales de CO₂ en México alcanzaron 683 millones de toneladas, lo que representa aproximadamente el 1.3% de las emisiones mundiales (SEMARNAT y INECC, 2018). El monitoreo de estas emisiones requieren establecer una base de referencia para el desarrollo de proyecciones y trayectorias de los procesos de los ciclos de carbono y nitrógeno, bajo las diferentes condiciones económicas, políticas, sociales y climáticas específicas del país (RMCC, 2015). La información sobre la dinámica de los ciclos del carbono y nitrógeno permitirá establecer parámetros e implementar sistemas sostenibles, y mejorar su capacidad de adaptación ante las variaciones climáticas (RMCC, 2015).

Es por ello importante analizar los avances en las investigaciones relacionados con la dinámica del carbono y nitrógeno, la importancia de la diversidad florística de los sistemas agroforestales (SAF), que impactan en las funciones ambientales y socioeconómicas (Romo, García, Uribe *et al.*, 2012). Los estudios reportados en el documento Mexicano de Cambio Climático, enfocan la importancia de los SAF en sus funciones ambientales, por lo que muchos de estos no son modelos replicables (RMCC, 2015), debido a que no integran la importancia de las funciones socioeconómicas de pequeños productores agrícolas y el efecto en la dinámica del carbono y nitrógeno en los sistemas. Además, la mayoría de estudios en México se relacionan con almacenamiento o flujos de carbono orgánico en el suelo y en la biomasa aérea (Rojas-García, Santoyo-Gómez, Gonzáles-Montiel *et al.*, 2017).

Uno de los sistemas que contribuye a la dinámica del carbono y el nitrógeno es el que aplica técnicas agroforestales, como el sistema agroforestal con café, el cual puede almacenar entre 85 y 188 Mg C ha⁻¹ (Espinoza-Domínguez, Krishnamurthy, Vázquez-Alarcón, *et al.*, 2012; Masuhara *et al.*, 2015).

Los SAF de café en el estado de Veracruz han disminuido su productividad debido a problemas fitosanitarios, como la roya (*Hemileia vastatrix*) y la broca (*Hyphotenemus hampei*), ambas detonadas por las variaciones climáticas, ya que el aumento de la temperatura en un grado centígrado ha afectado los procesos fisiológicos como la retención o caída de hojas, variaciones en las fechas de floración, fructificación y cosecha, con el aumento de plagas, hongos y enfermedades (Granados *et al.*, 2014). Estas variaciones climáticas en los SAF de café están generando una presión socioeconómica en los pequeños agricultores, causando el abandono, adopción de especies con baja calidad de taza o el cambio a monocultivos como el chayote (*Sechium edule*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), limón (*Citrus limon* (L.) Osbeck), aguacate (*Persea americana*), entre otros; este cambio de uso a monocultivo, se observa en productores de Veracruz, lo que trae consigo la pérdida en la diversificación de la producción, disminución de almacenaje y reciclaje de materia orgánica (MO), lo que afecta la calidad y precio del café, así como la dinámica del carbono y nitrógeno en los sistemas (Ruelas, Nava, Cervantes *et al.*, 2014).

En la literatura científica, hay múltiple evidencia de la importancia de los SAF para almacenar carbono, la importancia su diversificación y sus funciones socioeconómicas, lo que permite plantear la hipótesis de que aún no se abordan investigaciones enfocadas en un análisis que integre el funcionamiento de la dinámica de carbono y nitrógeno con la diversificación productiva, las funciones socioeconómicas y la capacidad de adaptación a las variaciones climáticas en los SAF de café. Para dilucidar sobre la hipótesis planteada, el objetivo de la presente investigación fue identificar las áreas con necesidad de investigación sobre carbono y nitrógeno en SAF con café en México.

2. Materiales y métodos

Se recopiló, analizó y sistematizó la información técnico-científica disponible en la literatura, sobre el potencial de los SAF para almacenar el carbono y nitrógeno, que influyen en los ciclos biogeoquímicos de carbono y nitrógeno, emisiones de gases de efecto invernadero, la importancia socioeconómica, socioambiental, la diversificación productiva, y los problemas que enfrentan los pequeños productores, así como su capacidad de adaptación ante variaciones climáticas. La recopilación de la literatura se realizó durante los meses de enero 2018 a febrero 2019, y se utilizaron los buscadores de Google Académico, FreeFullPDF, Science Direct, Scopus, Redalyc, ResearchGate; y el buscador del Consorcio Nacional de Recursos de Información Ciencia y Tecnología (CONRICyT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) que permitieron la búsqueda en: Agrosystems, Elsevier, Emerald, IOP, Nature, Oxford, Springer y Wiley, y las revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

La búsqueda consistió en incorporar once frases claves en español e inglés: 1) ciclo del carbono y nitrógeno en los SAF, 2) importancia ambiental de los SAF, 3) importancia económica de los SAF, 4) importancia social de los SAF, 5) carbono orgánico en SAF, 6) carbon dynamic in Mexico, 7) nitrogen dynamic in Mexico, 8) agroforestry systems, 9) coffee agroforestry systems, 10) CO₂ emission in agroforestry systems, y 11) estrategias para la adaptación al cambio climático en México. La búsqueda consideró todas las publicaciones hasta el año 2018.

Todas las publicaciones encontradas fueron organizadas en una base de datos de acuerdo al título, autor y año de publicación. Luego se ordenaron de forma alfabética y almacenaron en el programa de acceso gratuito Zotero (2018). En este programa la lista de publicaciones por autor y los documentos se exportaron en formato RIS a una carpeta de almacenamiento del ordenador. Ambos archivos se exportaron al programa Nvivo 12, donde se realizó un análisis de frecuencia de palabras con 15 caracteres. Se seleccionó este número de caracteres, puesto que las palabras o frases claves relacionadas con las temáticas de las publicaciones contienen al menos 15 caracteres.

El análisis de frecuencia de palabras permitió identificar las palabras claves más representativas de cada documento, es decir todas las palabras que se encontraron dentro del primer 25 por ciento. Estas palabras claves permitieron seleccionar las publicaciones que contenían mayor porcentaje de información en

las temáticas antes mencionadas, para ello se buscaron aquellas que contengan tres o más palabras claves en el resumen o abstract, y que deben representar el porcentaje del texto.

Las publicaciones seleccionadas se sometieron al análisis de conglomerados para identificar la relación entre los temas de investigación antes indicados; para ello, a través del programa Nvivo 12, se crearon parámetros de clasificación denominados nodos. Los nodos se codificaron con el primer 25 por ciento de palabras claves identificadas en las publicaciones con el análisis de frecuencia de palabras. El análisis de conglomerados permitió evaluar la frecuencia de investigaciones para cada tema y la relación entre ellos, estos resultados generaron los enfoques de discusión para analizar las publicaciones de carbono y nitrógeno realizadas en SAF de café en México.

3. Hallazgos principales

La prueba de frecuencia de palabras con 15 caracteres, generó 13 palabras que representan el 25% del total de palabras: café, carbono, orgánico, producción, cambio, climático, sistemas, agroforestales, nitrógeno, sustentabilidad, manejo, México y Veracruz, las que se encuentran representadas en la imagen de palabras más frecuentes en las 84 publicaciones analizadas (Figura 1).

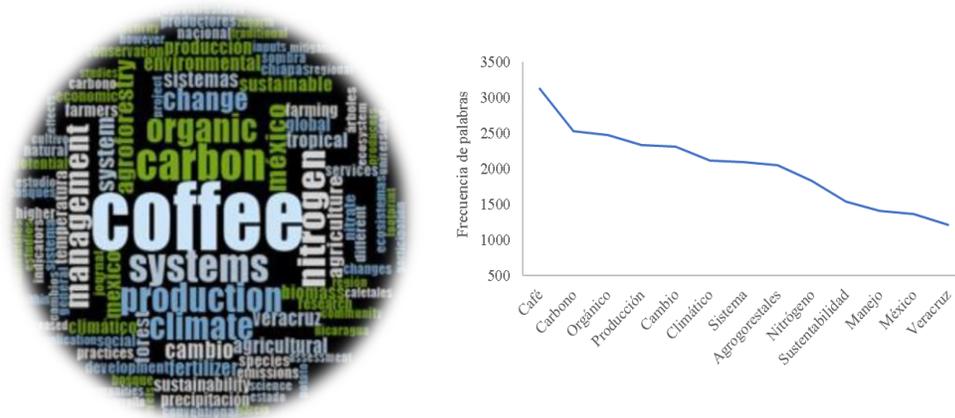


Figura 1. Distribución de las palabras más frecuentes en las publicaciones y documentos relacionados a las temáticas de estudio.

Las publicaciones que presentaron tres o más palabras claves en el texto del resumen o abstract fueron 54 de un total de 84 (Tabla 1). Con esta población de publicaciones se generó la clasificación de ocho temas (nodos), cuyas denominaciones se describen a continuación: (1) SAF y su relación con carbono (SAF y carbono) ;(2) SAF y su relación con nitrógeno (SAF y nitrógeno); (3) la diversidad de los SAF de café y su relación con carbono (SAF diversidad – café y carbono);(4) importancia ambiental de los SAF de café (SAF importancia ambiental);(5) importancia económica de los SAF de café (SAF importancia económica);(6) importancia social de los SAF de café (SAF importancia social);(7) SAF de café como medidas de mitigación al cambio climático (SAF mitigación CC);(8) los efectos del cambio climático en los SAF de café (SAF y CC).

Cuadro 1. Clasificación de las publicaciones por temática.

Referencia	Temas (nodos)	Referencia	Temas (nodos)
Abate <i>et al.</i> , 2017	8	Moguel y Toledo, 1999	3 ††
Aguirre <i>et al.</i> , 2016	3	Moreno <i>et al.</i> 2013	6 ††
Cano-Díaz <i>et al.</i> , 2015	4 y 6 ††	Nair <i>et al.</i> , 2015	1
Cardinael <i>et al.</i> , 2018	1	Ogbonna <i>et al.</i> , 2017	7 y 8
Castillo <i>et al.</i> , 2015	5 y 6	Orellana-Rivadeneira <i>et al.</i> , 2012	1 ††
Cruz <i>et al.</i> , 2016	5	Paul <i>et al.</i> , 2017	5, 7 y 8
De Carvalho <i>et al.</i> , 2016	1,3 y 8 ††	Paz Pellat <i>et al.</i> , 2016	1 y 4 ††
Ehrenbergerová <i>et al.</i> , 2016	1 y 8 ††	Pertuz y Pérez, 2016	5
Espinoza <i>et al.</i> , 2012	5	Pocomucha <i>et al.</i> , 2016	1 y 5
Falkowski <i>et al.</i> , 2016	4	Querné <i>et al.</i> , 2017	2
FAO, 2018	7 y 8 ††	Rahman, 2013	1 y 7
FIRA, 2016	5 ††	Rahn <i>et al.</i> , 2014	4 y 8 ††
Figueroa, 2016	5	Rigby y Cáceres, 2001	4 y 6 ††
Fox, 2008	4,5,6 y 8 ††	RMCC, 2015	7 y 8 ††
Galán y Garrido, 2012	7 y 8	Rojas-García <i>et al.</i> , 2017	1 y 4 ††
García <i>et al.</i> , 2015	1 y 3 ††	Romo <i>et al.</i> , 2012	5 ††
García-Oliva <i>et al.</i> , 2006	4	Rossner <i>et al.</i> , 2017	1 y 4 ††
Garedew <i>et al.</i> , 2017	3, 7 y 8	Roswall, 1982	2 y 4 ††
Gay <i>et al.</i> , 2004	5, 7 y 8 ††	Ruela <i>et al.</i> , 2014	3 y 4 ††
Granados <i>et al.</i> , 2014	7 y 8 ††	SAGARPA, 2017	5 ††
Groter y Ramseur, 2010	1 ††	SAGARPA, 2014	2, 5 ††
Gruber y Galloway, 2008	2 y 4 ††	Sánchez-Hernández <i>et al.</i> , 2018	5
Haggard <i>et al.</i> , 2011	3 ††	Sanderman y Baldock, 2010	1 y 7
Havlin <i>et al.</i> , 1999	4 ††	SEMARNAT e INECC, 2018	1, 7 y 8 ††
Hendrickson y Corbera, 2015	1 y 8 ††	Setia <i>et al.</i> , 2011	1
Hergoualc'h <i>et al.</i> , 2008	3 y 8	SIAP, 2014	2 ††
IPCC, 2013	7 ††	Smith <i>et al.</i> , 2013	7 y 8
Isaza y Cornejo, 2015	1, 7 y 8 ††	Soto <i>et al.</i> , 2010	1 y 6 ††
Jha <i>et al.</i> , 2014	3 ††	Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018	5, 6 y 8 ††
Katayama <i>et al.</i> , 2009	1, 4 y 8 ††	Souza <i>et al.</i> , 2010	3 y 4 ††
Kosmowski y Lalou, 2017	7 y 8	Suárez <i>et al.</i> , 2015	1, 2 y 4 ††
Lin, 2010	4 y 8 ††	Terán <i>et al.</i> , 2018	1
López <i>et al.</i> 2002	3 y 6 ††	Teodoro <i>et al.</i> , 2009	4 y 6 ††
Lorenz y Lal, 2010 a	4 ††	Valdés <i>et al.</i> , 2017	1 y 4 ††
Lorenz y Lal, 2010 b	1 ††	Vallejo <i>et al.</i> , 2015	3 y 8
Machado y Ríos, 2016	1, 3 y 6 ††	Van Rikxoort <i>et al.</i> , 2014	1, 7 y 8 ††
Macip-Ríos y Casa-Andreu, 2008	3	Verchot <i>et al.</i> ; 2008	4, 7 y 8
Masera y Sheinbaum, 2004	1, 6, 7 y 8 ††	Villers <i>et al.</i> , 20009	3, 7 y 8 ††
Martínez-Yrizar <i>et al.</i> 2017	1, 2 y 4 ††	Yago T.da <i>et al.</i> , 2019	1
Masuhara <i>et al.</i> , 2015	1 y 4 ††	Youkhana y Idol, 2011	1 y 3
Mediana-Meléndez <i>et al.</i> , 2016	4	Zamora, 2015	7 y 8 ††
Méndez <i>et al.</i> , 2010	3	Zebarth <i>et al.</i> 2009	2 ††

Los 54 documentos fueron analizados con la técnica estadística multivariante de conglomerados (Figura 2), este análisis, muestra que el mayor porcentaje de publicaciones están ligadas a las temáticas ambientales y en segundo nivel se agrupan las publicaciones relacionadas a diversidad, importancia económica,

nitrógeno, puesto que ambos dependen del aporte de biomasa de la composición florística, del manejo integrado que se den en los SAF de café, y su sensibilidad ante las variaciones climáticas.

El ciclo del carbono permite explicar cómo es que se forman los reservorios o el almacenamiento de carbono, los que representan la dinámica de carbono en el suelo, la que depende de la incorporación de materia orgánica. Cuando está se descompone en presencia de agua, temperatura, microorganismos y oxígeno en un tiempo determinado libera CO₂ el cual regresa a la atmósfera y la otra parte se transforma en materia húmica formando el reservorio de humus. Sin embargo, la materia orgánica también se genera en el subsuelo, la cual se compone de detritos en su mayor parte por raíces finas muertas cuya descomposición emite CO₂ a la atmósfera y se suma a la respiración de las raíces para conjuntar la respiración total del suelo (Orellana-Rivadeneira, Sandoval-Solís, Linares-Fleites *et al.* 2012).

En la Figura 4 se indica que existen 27 publicaciones relacionadas a los SAF y la dinámica de carbono y nitrógeno, de las cuales seis corresponden a los siguientes autores: Rojas-García *et al.* (2017), Ehrenbergerová, Cienciala, Kučera *et al.* (2016), Katayama, Kume, Komatsu *et al.* (2009), Valdés, Vásquez, Gallardo *et al.* (2017), Paz Pellat, Argumedo, Cruz *et al.* (2016), Espinoza *et al.* (2012). Estas publicaciones se enfocan en la biomasa aérea o contenido de carbono total en el suelo, pero ninguno evidencia la dinámica en SAF de café considerando la dinámica de acumulación de carbono orgánico y su relación con la dinámica de nitrógeno, las funciones socioeconómicas y el potencial de los SAF de café para adaptarse a las variaciones climáticas.

Las publicaciones del ciclo del carbono en México según Rojas-García *et al.* (2017) muestran que hasta el 2017 en México se publicaron 713 documentos relacionados con el almacenamiento o flujos de carbono orgánico en el suelo. La referencia antes mencionada, considera que, de 713, sólo 435 se consideran de utilidad científica arbitrada para la ciencia del suelo, debido a que el resto corresponden a: tesis, notas técnicas o resúmenes de congresos; de las cuales el 86.1% cuantificaron el almacén de carbono en el suelo, 8.4% realizaron mediciones de flujo de carbono y 5.7% estudiaron la dinámica de carbono al interior del suelo. Estos últimos concluyen que los sistemas con vegetación diversificada generan condiciones edafoclimáticas óptimas, las cuales promueven el desarrollo de la biomasa radicular, aporte de materia orgánica y por tanto la respiración microbiana, además de ofrecer cobertura permitiendo controlar el flujo de CO₂ del suelo. Lo anterior garantiza la calidad física, química y biológica del mismo, promoviendo el almacén de carbono en el suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Ehrenbergerová *et al.* (2016) y Katayama *et al.* (2009).

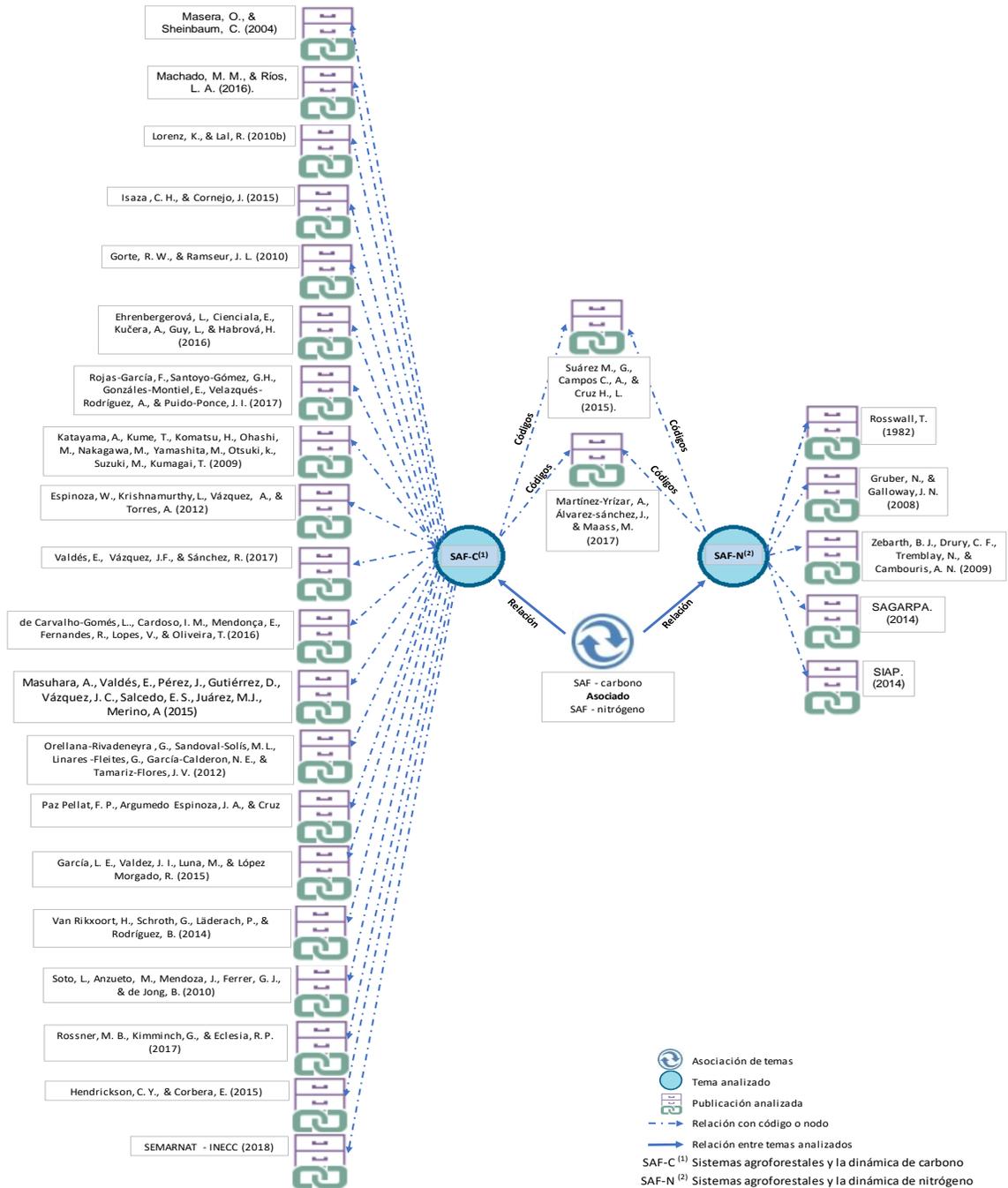


Figura 4. Análisis de relación en los temas: dinámica de carbono en sistemas agroforestales con café y dinámica de nitrógeno en sistemas agroforestales con café.

En México las investigaciones en SAF de café reportan su potencial en la fijación de carbono mediante fotosíntesis, debido a que se caracterizan por tener una composición florística diversa que influye en el almacenamiento total de carbono del suelo (Valdés *et al.*, 2017). Del mismo modo Espinoza *et al.* (2012) encontraron que el sistema agroforestal con café-cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*) fue el que mostró mayor cantidad de carbono, con 115 Mg C ha⁻¹y

58 Mg C ha⁻¹, en biomasa aérea y en el suelo respectivamente. Por otro lado, Valdés *et al.* (2017) compararon SAF de café bajo sombra, bosque mesófilo y un potrero, siendo el sistema agroforestal con café- roble encino (*Quercus stellata*) el que presentó mayor contenido de carbono aéreo, con 374 Mg C ha⁻¹ y de 77 Mg C ha⁻¹ en el suelo a una profundidad de 60 cm. Estudios del Programa Mexicano de Carbono (Paz Pellat *et al.*, 2016) realizados en cafetales localizados en Veracruz, indican que el contenido de carbono en un sistema depende del manejo, puesto que al comparar policultivos tradicionales (entre 172 y 207 Mg C ha⁻¹) con comerciales (entre 166 y 244 Mg C ha⁻¹), no se encontraron diferencias estadísticas significativas tanto para carbono orgánico del suelo como para biomasa aérea; sin embargo, los valores fueron mayores que un sistema de potrero (156 Mg C ha⁻¹), debido a su baja densidad de biomasa arbórea.

Mientras que la dinámica de nitrógeno en los SAF se puede explicar a partir del autosuministro de materia orgánica. La materia orgánica cae al suelo y mediante el proceso de mineralización provee de nitrógeno inorgánico, ya que durante el proceso de su descomposición la mayoría de veces libera amonio (NH₄⁺), producto inicial de la mineralización heterótrofa y después por la oxidación realizada por microorganismos autótrofos se transforma a nitrato (NO₃⁻) a través del proceso conocido como nitrificación (Havlin, Beaton, Tisdale *et al.*, 1999). El suministro de ambas formas de nitrógeno para las plantas depende de las propiedades del suelo, las prácticas de manejo, las condiciones ambientales que regulan la actividad biótica (Zebarth, Drury, Tremblay *et al.*, 2009) y la calidad de la materia orgánica en el suelo, que está definida por el tipo de composición florística del sistema (Suárez, Campos y Cruz, 2015).

Los procesos de fijación, desnitrificación y nitrificación que se generan en el ciclo del nitrógeno por causa de microorganismos, es regulado por las condiciones ambientales y la composición florística de los sistemas agroforestales, puesto que la respiración de estos organismos depende de los patrones de precipitación y los cambios en la temperatura. El aumento de la actividad microbiana podría generar mayores emisiones de CO₂; sin embargo, se incrementa la cantidad de nitrógeno absorbido por las plantas y por tanto se disminuye el contenido de N₂ liberado a la atmósfera que con el oxígeno forma óxido nitroso (N₂O), considerado como gas de efecto invernadero, o se lixivia contaminando acuíferos, ríos y lagos, generando efectos colaterales, puesto que la obtención de amonio por procedimiento de Haber – Bosch produce elevados niveles de CO₂ derivado de la materia prima utilizada y de consumo de energía requerida en el proceso.

Por tanto, el ciclo del nitrógeno está estrechamente relacionado al ciclo del carbono debido a que la disponibilidad de alguno de estos elementos influirá, no sólo en la actividad microbiana, sino también en el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Gruber y Galloway, 2008), lo que coincide con lo señalado por el IPCC (2013) el cual indica que el ciclo del nitrógeno afecta las interacciones de las fuentes y sumideros de CO₂ y por tanto las emisiones de N₂O en la tierra y océanos. A pesar de la importancia de estudiar la dinámica de nitrógeno y carbono de manera integrada hasta el año 2018 sólo se encontraron

dos publicaciones relacionadas en SAF de café, las cuales indican que: (1) la mineralización de la materia orgánica y el suministro de nitrógeno están en función del tipo de ecosistema y de las propiedades del suelo, características importantes de los SAF de café (Suárez *et al.*, 2015); (2) existen estudios de la dinámica de nitrógeno pero aún son escasos los estudios con enfoque integral (Martínez- Yrizar *et al.*, 2017).

De acuerdo a los resultados de las investigaciones analizadas, se evidencia el potencial de los SAF de café diversificados en México para almacenar carbono y se confirma la hipótesis de que aún no se abordan investigaciones enfocadas en un análisis integrado de la dinámica de carbono y nitrógeno con la diversificación productiva, las funciones socioeconómicas y la capacidad de adaptación a las variaciones climáticas en los SAF de café.

3.2. Emisiones de gases de efecto invernadero en SAF de café

Estudios analizados por Isaza y Cornejo (2015) indican que una alternativa para mitigar las emisiones de CO₂ son los SAF, entre ellos los SAF de café, ya que permite la fijación de carbono en el sistema a través del componente arbóreo, además generan múltiples beneficios para los productores, contribuyendo a la producción y por tanto aportando a las condiciones socioeconómicas.

El reporte del (IPCC, 2013) indica que al año 2011 la concentración de óxido nitroso N₂O aumentó en un 20% considerando 1975 como año base. Es decir, el incremento fue de 324 a 388.8 ppm en 36 años. Lo anterior se atribuye a las actividades humanas y principalmente a la agricultura con la aplicación de fertilizantes y abonos nitrogenados, y la producción de ácido nítrico.

En México las emisiones de N₂O en el año 2013 fueron 22 860.1 t, de los cuales el 67.2% se debe a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el 18.2% por transporte, 9.3% al manejo del estiércol, 2.8% al tratamiento y eliminación de las aguas residuales y el 2.5% por otras fuentes (SEMARNAT-INEGYCEI, 2018). De acuerdo con SAGARPA durante el año 2014 se realizó fertilización química en 66.8% de las 22.2 millones de hectáreas sembradas en el país, concentrándose el 43% de superficie fertilizada en Jalisco (8.3%), Sinaloa (8.1%), Veracruz (7.2%), Michoacán (6.8%), Chihuahua (6.8%) y Guanajuato (5.9%). Datos del SIAP reportan que los fertilizantes se aplicaron en cultivos de maíz grano (*Zea mays*), sorgo grano (*Sorghum bicolor*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), café (*Coffea arabica*) y en trigo grano (*Triticum* spp.).

3.3. Potencial de los sistemas agroforestales con café en México y su relación con la dinámica de carbono y nitrógeno

Algunos de los SAF más importantes en México son los que incluyen café, puesto que existen 58 regiones cafetaleras divididas en 400 municipios y 4500 localidades. A nivel nacional, 15 estados son productores de café: donde Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla concentran el 84% de la producción nacional. La producción ubica a México en el onceavo puesto a nivel mundial, aportando el 2.2% de la producción mundial de café del ciclo productivo 2017-2018 (FIRA, 2019).

Lo anterior confirma el potencial para almacenar carbono y el potencial económico de los SAF de café, cuyos atributos como la biodiversidad, interacciones biológicas y producción, podrían favorecer a la dinámica de carbono y nitrógeno en el suelo, a través del mantenimiento de la calidad de suelos y las condiciones microclimáticas (Souza, de Goede, Brussaard *et al.*, 2010); estas condiciones climáticas se deben al componente arbóreo y aportan al almacenamiento de agua, proporcionan sombra y nutrientes, permiten el desarrollo óptimo de café, y además reducen la pérdida de agua por evaporación importante para generar condiciones edafoclimáticas que favorezcan el almacén de carbono en el suelo (Lin, 2010). Del mismo modo, De Carvalho Gomes *et al.* (2016) en sus estudios de SAF de café en la zona de Minas Gerais - Brasil indican que la estabilidad del microclima determina la dinámica del flujo de salida del CO₂ del suelo, cuya variación tiende a disminuir con la cobertura vegetal. Rossner, Kimminch, y Ecclesia (2017), también señalan que la acumulación de carbono orgánico en el suelo no depende sólo de la cobertura vegetal, sino también del impacto generado por el manejo dentro del sistema. Moguel y Toledo (1999) indican que el manejo es un factor que afecta la covariación de los sistemas, generando un cambio de paradigma, pues en trabajos ecológicos no consideran al manejo como un efecto importante en la evaluación de la biodiversidad; García *et al.* (2015), también indican que tanto el factor estructura como manejo son importantes y el manejo genera una gradiente de intensificación en la riqueza de los sistemas de cafetales evaluados (61 especies), con una riqueza inferior que el sistemas naturales como la Selva Media perennifolia(65 especies).

Por otro lado, la FAO (2018) indica que los SAF de café, además de contribuir al secuestro de carbono, permiten reducir los efectos de fenómenos climáticos, enriquecen la biodiversidad en el paisaje, aumentan la estabilidad del sistema, evitan o disminuyen la erosión del suelo, aumentan los índices de infiltración, mejora la fertilidad y humedad de los suelos, aumenta la presencia de la materia orgánica y fauna en el suelo, y aporta nitrógeno al suelo. Estas características ambientales de los SAF, coinciden con Garedew, Hailu, Lemessa *et al.* (2017) quienes demuestran que los SAF con alta densidad de siembra y diversificados con árboles, pueden disminuir los efectos de la temperatura promedio anual en un 1°C, comparados con cafetales manejados con árboles aislados. Por otro lado, los resultados de Masuhara *et al.* (2015) quienes indican que los SAF en Veracruz pueden almacenar en promedio 150 Mg C ha⁻¹. Del mismo modo, Moreno, Toledo y Casas (2013) caracterizaron a los SAF tradicionales de México como sistemas que integran prácticas de conservación de suelos y la diversidad de la producción dentro de los sistemas, que podrían afectar las condiciones de manejo y por tanto a la dinámica de carbono y nitrógeno.

3.4. Los factores económicos y sociales de los sistemas agroforestales con café y su influencia en la dinámica de carbono y nitrógeno

La importancia económica de los SAF de café en México radica en que su producción lo ubica en el onceavo a nivel mundial, las zonas que representan el 89.7% de esta producción corresponden a Chiapas (39%), Veracruz (30%), Oaxaca (13%), seguido de Puebla, Guerrero, Hidalgo, Nayarit y San Luis Potosí,

según el reporte del ciclo cafetalero 2016/17 de SAGARPA (2017). Del mismo modo el análisis realizado por Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2016), indica que durante los últimos diez años la producción de café cereza decreció a una tasa promedio anual de 6%; esta tendencia se explica principalmente por la reducción de productividad de los cafetales durante los últimos años y por la reducción de superficie cosechada. El rendimiento promedio de café cereza en México se redujo a una tasa promedio anual de 3.5%, y la superficie cosechada decreció en 1%; de acuerdo con información del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en 2015/16 la producción de café verde en México fue de 2.5 millones de sacos de 60 kg, nivel más bajo desde el ciclo 1962/63. En el ciclo 2015/16 el rendimiento promedio nacional de café cereza fue de 1.3 toneladas por hectárea. Este nivel de productividad es el mínimo desde que se tiene registro, en 1979/80, y es consecuencia, entre otros factores, a la enfermedad de la roya y a la avanzada edad de los cafetales. Ambos factores, pueden influir en el manejo de los cafetales y por tanto generar variaciones en la dinámica de carbono y nitrógeno de los SAF:

La caficultura otorga diversos beneficios económicos, debido a la diversificación de sus plantaciones con árboles frutales y madera de alto valor comercial (Haggar, Barrios, Bolaños *et al.*, 2011, Van Rikxoort, Schroth, Läderach *et al.*, 2014). En estudios realizados en Chiapas se encontró que estos productos representan el 30% de ingresos, valor obtenido por la diversidad de especies nativas (88.5%) que conforman los sistemas de café; lo que coincide con el estudio realizado en Veracruz por Romo *et al.* (2012) quienes reportan que los SAF de café proporcionan entre 30 a 50% de ingresos.

Este aporte económico sumado a los conocimientos ancestrales de las comunidades indígenas sobre el uso de los diferentes árboles (Soto, Anzueto, Mendoza *et al.*, 2010) permite diferenciar la producción de café en México con otros países como Nicaragua donde la diversificación productiva sólo produce madera y leña (Rahn, Läderach, Baca *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista social, los SAF de café se caracterizan por presentar una baja dependencia de insumos y recursos externos, lo cual permite que controlen las externalidades y responden a los cambios sin poner en riesgo la productividad. Esta característica promueve una visión justa y equitativa de los costos y beneficios brindados por el sistema entre las personas o grupos involucrados (Rigby y Cáceres, 2001) y conservar los conocimientos tradicionales sobre el manejo adaptándolas a las condiciones ecológicas y socioeconómicas locales (López, Masera y Astier, 2002).

En México se reporta que los SAF de café evaluados a través de los indicadores de tenencia de tierra, apoyo de mano de obra familiar, presencia de parientes en la vereda, lazos de vecindad y organización comunitaria, son sostenibles, puesto que la diversidad productiva contribuye a enfrentar las amenazas por la dependencia de un sólo producto comercializable; sin embargo, el estudio mostró que el indicador social más importante es la tenencia de tierra, debido a que permite el acceso a financiamiento y por tanto genera oportunidades de inversión

para la instalación de nuevas plantas o en el manejo de los SAF de café (Machado y Ríos, 2016).

Las características socioeconómicas de los SAF de café en México evidencian que existe una diversidad productiva, una composición florística en multiestratos y un manejo tradicional, lo que influye en: 1) el aporte y calidad de materia orgánica, 2) condiciones meteorológicas dentro del sistema, 3) establecimiento de biomasa radicular, 4) disponibilidad de nutrientes, 5) actividad microbiana edáfica y 6) producción de biomasa aérea. Los seis puntos mencionados generan insumos y condiciones dentro del SAF de café que afectan la dinámica de carbono y nitrógeno, puesto que la calidad de materia orgánica depende de la diversidad de la composición florística del sistema y el tipo de manejo que aplique el productor.

3.5. Alcances y limitaciones de los SAF de café en México

Los SAF de café de acuerdo a los resultados mostrados en los apartados anteriores contribuyen a mantener o incrementar los sumideros de carbono; sin embargo, generan costos de mantenimiento y establecimiento, inversión que los productores reflejan en el tiempo de mano de obra, cuyo retorno es a largo plazo debido al tipo de especies arbóreas que componen a los SAF. Estas especies arbóreas además ocupan espacios considerables, lo que limita el uso de la tierra para producir alimentos de autoconsumo a corto plazo; otra limitante de los SAF de café en México es que la mayoría de productores cuentan con áreas pequeñas (2.5 ha en promedio) por lo que la producción de los productos diferentes al café es baja y por tanto no permite la comercialización en mercados organizados; éstas limitantes permiten evidenciar, según Soto y Jiménez (2018), que se requiere de innovaciones que generen productos intermedios, rentabilidad y autoconsumo, éstas innovaciones además deben contemplar las tradiciones de los productores de tal manera que el manejo se realice de una forma duradera, diversa y con beneficios socioambientales.

Del mismo modo, el estudio econométrico desarrollado en Veracruz, indica que los impactos del cambio climático en la producción de café para el 2050 empeorará, puesto que de mantenerse la misma cantidad de hectáreas y productores dedicados al café y tomando el precio medio rural de café fijo de 3 508.4 pesos mexicanos por hectárea, tendríamos que para el productor promedio con 2.26 ha, el ingreso que percibiría no alcanzaría para cubrir sus costos de producción (Gay, Estrado, Conde *et al.*, 2004). Por ello urge generar alternativas de producción que reduzcan costos y pérdidas, e incrementen la capacidad de adaptación al cambio climático. Por tanto, el diseño de un cafetal ideal debe enfocarse en conservar o incrementar la diversidad de árboles, incluir frutales y otras plantas del dosel de sombra y aumentar de tal manera los servicios ambientales para beneficio de la finca, los medios de vida de la familia y la comunidad en general (Rahn *et al.*, 2014, Jha, Bacon, Philpott *et al.*, 2014), generando un balance en los rendimientos de café, aprovechando los bienes y servicios de las plantas asociadas (Fox, 2008) y reduciendo el ataque de plagas y enfermedades (Teodoro, Klein, Reis *et al.*, 2009).

Las necesidades y limitaciones de los SAF de café expuestos permiten evidenciar que las publicaciones se enfocaron en la diversificación productiva, organización, mercado, sostenibilidad socioeconómica, innovaciones y problemas fitosanitarios; sin embargo, aún no se generan investigaciones que integren estos enfoques con la dinámica de carbono y nitrógeno, los ciclos biogeoquímicos y la capacidad de adaptación en los SAF de café ante las variaciones climáticas.

3.6. Las necesidades de investigación en la dinámica de carbono y nitrógeno en los SAF

En México la implementación de innovaciones hasta el momento no presenta resultados favorables para el productor, puesto que aún existe contradicciones entre las necesidades sociales con los paradigmas de la economía (Hendrickson y Corbera, 2015). Cano-Díaz, Cortina-Villar y Soto-Pinto (2015) coinciden en que la agricultura en general manejada con acciones colectivas procedentes de experiencias y conocimientos de las comunidades indígenas y campesinas, así como de los productores, permiten un mecanismo de adaptación a los cambios; sin embargo, estos conocimientos no son valorados ni tomados en cuenta, por lo contrario, se consideran atrasados. Por otro lado, en el análisis realizado por Soto *et al.* (2010) en Chiapas confirman que el éxito de los SAF depende del nivel de organización de los propietarios para conocer, controlar y monitorear sus estrategias de adaptación a cambios, entre ellos los riesgos climáticos, puesto que el manejo a través de los SAF se considera sustentable según Zamora (2015).

Desde el año 2014 los SAF de café presentan problemas fitosanitarios, ocasionados por la roya anaranjada, lo que afecta a la reducción del 50% de la floración y la baja producción de grano (Villers, Arizpe, Orellana *et al.*, 2009). La producción de café para el ciclo de cosecha 2014/2015 en Veracruz decreció en 30.8% nivel más bajo desde el ciclo 1979/1980 (FIRA, 2016); este problema se atribuye a las variaciones climáticas de los últimos años. Estas variaciones podrían modificar la dinámica de carbono y nitrógeno en los SAF, a partir de la reducción de residuos orgánicos y la modificación de las condiciones edafoclimáticas.

4. Conclusión

La literatura científica evidencia que los SAF de café diversificado tienen potencial para almacenar carbono y con ellos contribuir a la mitigación de las variaciones climáticas. Las publicaciones analizadas se enfocaron principalmente a calcular los flujos como emisiones y almacenes de carbono, y la fijación de nitrógeno, por lo que se identifica una estrecha relación entre la dinámica de carbono y nitrógeno, así como la importancia ambiental de los SAF de café. Sin embargo, son pocos los estudios que abordan la dinámica de nitrógeno y que relacionan esta con la dinámica de carbono, con la diversificación productiva y los ámbitos socioeconómicos. Esto revela que aún hay necesidades de vincular la investigación de carácter ambiental sobre carbono y nitrógeno, con los aspectos como la diversificación productiva, las funciones socioeconómicas y la capacidad de adaptación a las variaciones climáticas en los SAF con café en

México, por lo que la investigación debe enfocarse en: (1) cómo la diversificación productiva en los SAF con café influye en la dinámica de carbono y nitrógeno; (2) cómo las variaciones socioeconómicas afectan la dinámica de carbono y nitrógeno en los SAF con café; (3) el grado de sensibilidad de la dinámica de carbono y nitrógeno ante las variaciones climáticas; (4) identificar qué tipo de capacidades de adaptación ambientales y socioeconómicas permiten mantener la dinámica de carbono y nitrógeno, con flujos en equilibrio.

5. Literatura citada

- Abate, E., Semie, N., Ayenew, B. (2017). Climate Change Adaptation Activities for Agricultural Development in Ethiopia: A Review of Potentials. In: Leal Filho, W., Belay, S., Kalangu, J., Menas, W., Munishi, P., Musiyiwa, K. (Eds.), *Climate Change Adaptation in Africa. Climate Change Management*. Springer, Cham, pp. 553-566. DOI: 10.1007/978-3-319-49520-0_34
- Aguirre Cadena, J.F., Cadena Iñiguez, J., Ramírez Valverde, B., Trejo Téllez, B.I., Juárez Sánchez, J.P., Morales Flores, F.J. (2016). Crop diversification in coffee plantations as a development strategy: Amatlan case. *Acta Universitaria*, 26 (1), pp. 30-38. DOI: 10.15174/au.2016.833
- Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L., Bernoux, M. (2018). Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letter*, 13 (2), pp 124020. DOI: 10.1088/1748-9326/aaeb5f
- Cano-Díaz, V.C., Cortina-Villar, S., Soto-Pinto, L. (2015). La construcción de la acción colectiva en una comunidad del área natural protegida: La Frailescana, Chiapas, México. *Argumentos*, 28(77), pp.79-96.
- Castillo, M., Rodríguez, C., López, R. (2015). Contexto institucional e impactos socioeconómicos y ecológicos de la agricultura orgánica en la caficultura tradicional, municipio Andrés Bello, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 56 (2), pp. 163-183.
- Cruz Aguilar, R., Leos Rodríguez, J.A., Uribe Gómez, M., Rendón Medel, R. (2016). Evaluación financiera y socioeconómica del sistema agroforestal tradicional café-plátano-cítricos en Tlapacoyan, Veracruz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7 (SEP 16), pp. 3287-3299. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.397>
- De Carvalho Gomes, L., Cardoso, I., Mendonça, E., Fernandes, R., Lopes, V., Oliveira, T. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, pp. 30-39. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.05.001
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Perú. *Agroforestry Systems*, 90(3), pp. 433-445. DOI: 10.1007/s10457-015-9865-z

- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revistas Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), pp. 57-70. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- Espinosa-García, J.A., Uresti-Gil, A., Moctezum-López, G., Uresti-Durán, D., Góngora-González, S.F., Inurreta-Aguirre, H.D. (2016). Productividad y rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7 (8), pp. 2011-2024. DOI: 10.29312/remexca.v7i8.133
- Falkowski, T.B., Diemont, S.A., Chankin, A., Douterlungne, D. (2016). Lacandon Maya traditional ecological knowledge and rainforest restoration: Soil fertility beneath six agroforestry system trees. *Ecological Engineering*, 92, pp. 210-217. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.002
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). Agricultura climáticamente inteligente. 2^{da} Edición. Roma, Italia, 60p.
- Figuroa, O. (2016). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de café en fincas-hogar del Sector San José, Municipio de Linares-Nariño. *Tendencias*, 17 (2), pp. 111-125
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2016). Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. Café 2016. Documento técnico de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. México, 37p.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2019). Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. Café 2019. Documento técnico de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. México, 21p.
- Fox, J.A. (2008). Confronting the Coffee Crisis: Fair Trade, Sustainable Livelihoods and Ecosystems in Mexico and Central America. En: Bancon, C.M., Méndez, E., Gliessman, S.R., Goodman, D., Fox, J.A (Eds.), Mit Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 390p.
- Galán, D., Garrido, J.L. (2012). Cambio climático. Perspectivas futuras. *Observatorio Medioambiental*, 15, pp. 11-18. DOI: 10.5209/rev_OBMD.2012.v15.40329
- García Mayoral, L.E., Valdez Hernández, J. I., Luna Cavazos, M., López Morgado, R. (2015). Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y Bosques*, 21(3), pp. 69-82.
- García-Oliva, F., Gallardo, J.F., Montaña, N. M., Islas, P. (2006). Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Followed by a Forest-to-pasture Conversion in Western Mexico. *Agroforestry Systems*, 66(2), pp. 93-100. DOI: 10.1007/s10457-005-2917-z

- Garedew, W., Hailu, B. T., Lemessa, F., Pellikka, P., Pinard, F. (2017). Coffee Shade Tree Management: An Adaptation Option for Climate Change Impact for Small Scale Coffee Growers in South-West Ethiopia. In: Leal Filho, W., Belay, S., Kalangu, J., Menas, W., Munishi, P., Musiyiwa, K. (Eds), *Climate Change Adaptation in Africa. Climate Change Management*. Springer, Cham, pp. 647 – 659. DOI: 10.1007/978-3-319-49520-0_40
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H. (2004). Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). En: García Codron, J., Diego Liaño, C., Fdez. De Arróyabe Hernández, P., Garmendia Pedraja, C., Rasilla Álvarez, D. (Eds), *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander. México, Serie A (4), pp. 651-660.
- Granados, R., Medina, M., Peña, V. (2014). Variación y cambio climático en la vertiente del golfo de México: Impactos en la caficultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, pp. 473-485.
- Gruber, N., Galloway, J. N. (2008). An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451(7176), pp. 293-296. DOI: 10.1038/nature06592
- Haggar, J., Barrios, M., Bolaños, M., Merlo, M., Moraga, P., Munguia, R., Pince, A., Romero, S., Soto, G., Staver, E., Virginio, E. (2011). Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems*, 82(3), pp. 285-301. DOI: 10.1007/s10457-011-9392-5
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. (1999). Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 6^{ta} Edición. USA (Ed.) Upper Saddle River: Prentice-Hall Inc. North Carolina State University, USA, 499p.
- Hendrickson, C.Y., Corbera, E. (2015). Participation dynamics and institutional change in the Scolelté carbon forestry project, Chiapas, Mexico. *Geoforum*, 59, pp. 63-72. DOI: 10.1016/j.geoforum.2014.11.022
- 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) pp. 329-345.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. United Kingdom and Nueva York, 1535p.
- Isaza, C., Cornejo, J. (2015). Café y el ciclo del carbono. Cambio climático y carbono en café. Documento técnico. Solidaridad y Norad. Netherlands, 40p.
- Jha, S., Bacon, C.M., Philpott, S.M., Méndez, V.E., Läderach, P., Rice, R.A. (2014). Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity.

BioScience, 64(5), pp. 416-428. Doi: 10.1093/biosci/biu038

- Katayama, A., Kume, T., Komatsu, H., Ohashi, M., Nakagawa, M., Yamashita, M., Otsuki, K., Suzuki, M., Kumagai, T. (2009). Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), pp. 1666-1673. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.05.007
- Kosmowski, F., Lalou, R. (2017). The Association of Monetary, Multidimensional and Traditional Poverty with Climate Change Adaptive Capacities in Northern Benin. In: Leal Filho, W., Belay, S., Kalangu, J., Menas, W., Munishi, P., Musiyiwa, K. (Eds), *Climate Change Adaptation in Africa. Climate Change Management*. Springer, Cham, pp. 727-746. DOI: 10.1007/978-3-319-49520-0_45
- Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), pp. 510-518. DOI 10.1016/j.agrformet.2009.11.010
- López, S., Masera, O., Astier, M. (2002). Evaluating the sustainability of complex socioenvironmental systems. the MESMIS framework. *Ecological Indicators*, 2(1-2), pp.135-148. DOI: 10.1016/S1470-160X(02)00043-2
- Lorenz, K., Lal, R. (2010 a). Carbon Dynamics and Pools in Major Forest Biomes of the World. En: Lorenz, K., Lal, R. (Ed.), *Carbon Sequestration in Forest Ecosystems*. Ohio State University, USA, pp. 159-205.
- Lorenz, K.; Lal, R. 2010 b. Carbon sequestration in forest ecosystems. Dordrecht: Springer Heidelberg London. New York, 289p.
- Machado, M. M., Ríos, L. A. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: revisión sistemática. *Idesia (Arica)*, 34(2), pp. 15-23. DOI 10.4067/S0718-34292016005000002
- Macip-Ríos, R., Casas- Andreu, G. (2008). Los cafetales en México y su importancia para la conservación de los anfibios y reptiles. *Acta Zoológica Mexicana (n.s.)*, 24 (2), pp. 143-159. DOI: 10.21829/azm.2008.242710
- Masera, O., Sheinbaum, C. (2004). Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional. En: Fernández, A., Martínez, J., Osnaya, P. (Eds.), *Cambio climático: una visión desde México*. INE-SEMARNAT, México, pp. 355-368.
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: Dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, pp. 27-41. DOI: 10.1016/j.rmb.2017.10.008
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E. S., Juárez, M.J., Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), pp. 66-93.

- Medina-Meléndez, J.A., Ruiz-Nájera, R.L., Gómez-Castañeda, J.C., Sánchez-Yáñez, J.M., Gómez-Alfaro, G., Pinto-Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10 (2), pp. 33-43.
- Méndez, V.E., Bacon, Ch. M., Olson, M., Morris, K. S., Shattuck, A. (2010). Agrobiodiversity and Shade Coffee Smallholder Livelihoods: A Review and Synthesis of Ten Years of Research in Central America. *The Professional Geographer*, 62 (3), pp. 357 -376. DOI: 10.1080/00330124.2010.483638
- Moguel, P., Toledo, V. M. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), pp. 11-21. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x
- Moreno, A. I., Toledo, V. M., Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), pp. 375-398. DOI: 10.17129/botsci.419
- Nair, R., Mehta, C.R., Sharma, S. (2015). Carbon sequestration in soils - A Review. *Agricultural Reviews*, 36 (2), pp. 81-99. DOI: 10.5958/0976-0741.2015.00011.2
- Ogbonna, C., Albrecht, E., Schönfelder, R. (2017). Adaptation Opportunities to Climate Variability and Potential Effects on Sustainable Development. The Case of Nigeria's Niger Delta Region. In: Leal Filho, W., Belay, S., Kalangu, J., Menas, W., Munishi, P., Musiyiwa, K. (Eds), *Climate Change Adaptation in Africa. Climate Change Management*. Springer, Cham, pp. 711-726. DOI: 10.1007/978-3-319-49520-0_44
- Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval- Solís, M. L., Linares-Fleites, G., García-Calderon, N. E., Tamariz-Flores, J. V. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorio. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(1), pp. 123-135.
- Paul, C.; Weber, M.; Knoke, T. (2017). Agroforestry versus farm mosaic systems – Comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. *Science of the Total Environment*. 587-588 (2017), pp. 22-35. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.02.037
- Paz Pellat, F., Argumedo Espinoza, J., Cruz Gaistardo, C. O., Etchevers, B. J. D., De Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamerica*, 34(3), pp. 289 -310.
- Pertuz Peralta, V.P., Pérez Orozco, A. B. (2016). Caracterización socioeconómica de los productores de cafés especiales de Pueblo Bello (Cesar, Colombia). *Punto de Vista*, 7(11), pp. 119 – 139. DOI: 10.15765/pdv.v7i11.982
- Pocomucha, V. S., Alegre, J.C., Abregú, L. (2016). Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15 (2) pp. 107 -114. DOI:

10.21704/rea.v15i2.750

- Querné, A., Battie-laclau, P., Wery, J., Dupraz, Ch. (2017). Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Agronomy*, 84, pp. 35-46. DOI: 10.1016/j.eja.2016.12.001
- Rahman, Md. M. (2013). Carbon Dioxide Emission from Soil. *Agricultural Research*, 2 (2) pp. 132-139. DOI: 10.1007/s40003-013-0061-y
- Rahn, E., Läderach, P., Baca, M., Cressy, C., Schroth, G., Malin, D., Rikxoort, H., Shriver, J. (2014). Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: Where are the synergies?. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19 (8), pp. 1119-1137.
- Rigby, D., Cáceres, D. (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68(1), pp. 21-40. DOI: 10.1016/S0308-521X(00)00060-3
- RMCC (Reporte Mexicano de Cambio Climático). (2015). Grupo I. Bases Científicas. Modelos y Modelaciones. Reporte Mexicano de Cambio Climático. Universidad Nacional Autónoma De México/ Programa de Investigación en Cambio Climático. Ciudad de México, México, 40p.
- Rojas-García, F., Santoyo-Gómez, G.H., Gonzáles-Montiel, E., Velazqués-Rodríguez, A., Pulido-Ponce, J. I. (2017). La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(2), pp. 69-96.
- Romo, J. L., García, Y. B., Uribe, M., Rodríguez, D. A. (2012). Prospectiva financiera de los sistemas agroforestales de Fortín, Municipio de Atzalan, Ver. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), pp. 43-55. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2011.09.068
- Rosner, M. B., Kimminch, G., Ecclesia, R. P. (2017). Acumulación de carbono y su dinámica en forestaciones, sistemas silvopastoriles y pastizales en el NE de la provincia de Corrientes, Argentina. *Revista Forestal Yvyrareta*, 24, pp. 108-113.
- Rosswall, T. (1982). Microbiological regulation of the biogeochemical nitrogen cycle. *Plant and Soil*, 67(1-3), pp. 15-34. DOI: 10.1007/BF02182752
- Ruelas, L. C., Nava, M. E., Cervantes, J., Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20, (3), pp. 27-40.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. México, 11p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2014). Reporte nacional de consumo de fertilizantes químicos por estado en México. México, 15p.

- SEMARNAT e INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018). Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. México, 756p.
- Sánchez-Hernández, S., Escamilla-Prado, E., Mendoza-Briseño, M.A., Nazario-Lezama, N.(2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *AgroProductividad*, 11 (4), pp. 80-86.
- Sanderman, J., Baldock, J.A. (2010). Accounting for soil carbon sequestration in national inventories: a soil scientist's perspective. *Environmental Research Letters*, 5 (3), 034003 (6pp). DOI: 10.1088/1748-9326/5/3/034003
- Setia, R., Marschner, P., Baldock, J., Chittleborough, D., Verma, V. (2011). Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (3), pp. 667-674. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.12.004
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2014). Producción de cultivos con fertilización química. Información clave para impulsar el desarrollo rural sustentable. Reporte de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México, 48p.
- Smith, J., Pearce, B.D., Wolfe, M.S. (2013). Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer?. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28 (1), pp. 80 -92. DOI: 10.1017/S1742170511000585
- Soto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G. J., De Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 78(1), pp. 39-51. DOI: 10.1007/s10457-009-9247-5
- Soto, L., Jiménez, G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación, asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques*, 24(SPE), pp. 1-15. DOI: 10.21829/myb.2018.2401887
- Souza, H. N., Cardoso, I. M., Fernandes, J. M., Garcia, F. C. P., Bonfim, V. R., Santos, A. C., Carvalho, A.F., Mendonça, E.S. (2010). Selection of native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. *Agroforestry Systems*, 80(1), pp. 1-16. DOI: 10.1007/s10457-010-9340-9
- Suárez, M. G., Campos, C. A., Cruz, H. L. (2015). Dinámica del carbono y nitrógeno del suelo en ecosistemas de la costa tropical seca, en la mancha (CICOLMA), Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(3), pp. 347-361.
- Terán-Ramírez, M. A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V.A. (2018). Biomasa aérea y ecuaciones alométricas en un cafetal en la Sierra Norte de Oaxaca. *Ecosistemas y Recursos*

- Agropecuarios*, 5 (14), pp. 217-226. DOI: 10.19136/era.a5n14.1444
- Teodoro, A.; Klein, A. M.; Reis, P. R.; Tschardtke, T. (2009). Agroforestry management affects coffee pests contingent on season and developmental stage. *Agricultural and Forest Entomology*, 11(3), pp. 295-300. DOI: 10.1111/j.1461-9563.2008.00417.x
- Valdés, E., Vásquez, J., Gallardo, J., Sánchez, R. (2017). Estimación del carbono orgánico capturado en cafetales del área central del Estado de Veracruz (México). En: Gallardo, J.F. (Ed.). *La materia orgánica del suelo*. Chapingo, Texcoco. Estado de México, pp. 391-413.
- Vallejo, M., Casas, A., Pérez-Negrón, E., Moreno-Calles, A. I., Hernández-Ordoñez, O., Tellez, O., Dávila, P. (2015). Agroforestry systems of the lowland alluvial valleys of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve: an evaluation of their biocultural capacity. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11 (8) pp. 1-18. DOI: 10.1186/1746-4269-11-8
- Van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P., Rodríguez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), pp. 887-897. DOI: 10.1007/s13593-014-0223-8
- Verchot, L.V., Brienza, S., de Oliveira, V., Mutegi, J.K., Cattânio, J.H., Davidson, E.A. (2008). Fluxes of CH₄, CO₂, NO, and N₂O in an improved fallow agroforestry system in eastern Amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126 (1-2) pp. 113-121. DOI: 10.1016/j.agee.2008.01.012
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México, *Interciencia*, 34(5), pp. 322-329.
- Yago T.da, V., Leite, M.C., Moreira, G.F., Oliveira, E.C., Quartezeni, W., Sales, R.A. (2019). Soil carbon dioxide efflux in conilon coffee (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) plantations in different phenological phases in tropical climate in Brazil. *Chilean journal of agricultural research*, 79(3), pp. 366-375. DOI: 10.4067/S0718-58392019000300366
- Youkhana, A., Idol, T. (2011). Addition of Leucaena-KX2 mulch in a shaded coffee agroforestry system increases both stable and labile soil C fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5), pp. 961 – 966. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.01.011
- Zamora, M. C. (2015). Cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6, pp. 4-7.
- Zebarth, B. J., Drury, C. F., Tremblay, N., Cambouris, A. N. (2009). Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(2), pp. 113-132. DOI: 10.4141/CJSS07102

CAPÍTULO III. FACTORES SOCIO-ECONÓMICOS, EL MANEJO AGRONÓMICO Y LOS ALMACENES DE CARBONO - NITRÓGENO EN EL SISTEMA AGUACATE-CAFÉ

Resumen

El cultivo de aguacate tiende a desplazar a los policultivos tradicionales de café (PTC) en las zonas de mayor altitud en la región de Huatusco, Veracruz, México. Este cambio de uso de suelo modifica la composición florística y el manejo agronómico, ambos son afectados por factores socioeconómicos y generan variación en las condiciones edáficas, y puede afectar los almacenes de carbono (C) y nitrógeno (N). El objetivo de este capítulo fue identificar las variables socioeconómicas que modifican las características del manejo agronómico del sistema agroforestal aguacate-café (SAC) y que repercuten en los almacenes de C y N. Se analizaron cuatro sistemas agroforestales: cafetal renovado (SCR), cafetal con limpieza y poda severa (SCP), sistema café aguacate (SCA) y un monocultivo de aguacate (SMA), en donde se aplicaron entrevistas durante el año 2018, y cada sistema fue considerado como un estudio de caso. Se determinaron 56 variables socioeconómicas, agrupadas en: 1) económicas y de productividad; 2) sociales; y 3) manejo agronómico. En cada estudio de caso se delimitaron tres parcelas, donde se realizaron evaluaciones dasométricas y con curvas alométricas se determinó el carbono de la vegetación (CBV). Para los suelos se tomaron muestras de tres profundidades por triplicado en cada parcela. El carbono (COS) se determinó por vía seca y el nitrógeno (NTS) por Kjeldahl. Se realizó el análisis de componente principales para tipo de variables, con tres componentes. Cinco variables sociales explican 50.16% de variación del manejo agronómico y cuatro variables económicas el 50.85%. El manejo agronómico modificó el contenido de NTS porque impacta directamente en la intensidad del reciclaje de residuos orgánicos dentro del sistema. El SCA fue sensible a la inversión en insumos esporádicos, diversidad de mercado, acceso a recursos de educación, incorporación de material orgánico externo, y por tanto explican las variaciones en el manejo agronómico y en la dinámica de NTS y el COS, pero no afectó el contenido de carbono acumulado.

Palabras clave: diversificación productiva, manejo agronómico, capacidad de inversión, *Persea americana*, *Coffea arabica*.

1. Introducción

En la región de Huatusco, Veracruz, hay 6 286 ha de café establecidas bajo policultivos tradicionales de café (PTC), y estos sistemas representan 36.98% de su superficie total (Bautista *et al.*, 2018). Este tipo de sistema se caracteriza por intercalar los cafetos con diversas especies de plantas arbóreas y arbustivas, nativas e introducidas, que funcionan como sombra, generan un sistema complejo con alta diversidad florística, y proveen alimentos, medicina y materias primas, que son útiles para la subsistencia local (Moguel y Toledo, 1999).

Los PTC brindan beneficios socioeconómicos y tienen potencial para almacenar y capturar carbono (C), por su diversidad florística y las técnicas de manejo agronómico integrado (Pineda, Ortiz y Sánchez, 2005). Según Fernández, Acevedo, Villanueva *et al.* (2012), los sistemas agroforestales con café ofrecen condiciones edáficas semejantes a las de un bosque de niebla, por lo que su fertilidad es mejor, con respecto a un monocultivo, puesto que su dinámica estructural genera concentraciones de materia orgánica (MO) y nitrógeno total (N) en el suelo, mayores que las de un monocultivo. Masuhara *et al.* (2015) y Cristóbal, Tinoco, Prado *et al.* (2019) indican que en sistemas agroforestales con café localizados en Veracruz se puede almacenar 187.6 a 254.72 Mg ha⁻¹ de C total en el sistema y 14.21 Mg ha⁻¹ de N en promedio en el suelo. Además, Rojas-García *et al.* (2017) reportan que los estudios de los sistemas agroforestales en México analizan las interacciones entre los compartimientos de carbono orgánico del suelo y la biomasa aérea; sin embargo, aún no se reporta un análisis que integre las variables socioeconómicas y el valor de la diversificación productiva con otros cultivos sobre el manejo agronómico, ni su repercusión en los almacenes de C y N.

En el estado de Veracruz los PTC han disminuido su productividad debido a problemas fitosanitarios, tales como la roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), ocasionados por las variaciones climáticas, pues el aumento de la temperatura en un grado Celsius, afecta a los procesos biológicos como la retención o caída de hojas, variaciones en las fechas de floración, fructificación y cosecha, el aumento de plagas, hongos y enfermedades (Granados *et al.*, 2014). Estas variaciones climáticas generan una presión socioeconómica que promueve el abandono o cambio de cultivo, lo que ocasiona la pérdida de diversidad productiva, disminución de almacenaje y reciclaje de residuos orgánicos, así como la afectación de la calidad del café, la dinámica de C en el sistema y los contenidos totales de N en el suelo (Ruelas *et al.*, 2014; Suárez *et al.*, 2015).

El cultivo de aguacate actualmente ha desplazado a los PTC porque el estado de Veracruz ofrece condiciones edafoclimáticas y ecotopográficas para su desarrollo (Galindo, Milagro, Alejandre *et al.*, 2011), el cual tiene alto valor en el mercado nacional e internacional, cuya aportación en el 2014 por México fue 62% al comercio mundial (Sánchez, Escamilla, Mendoza, *et al.*, 2018). Este cambio de uso de suelo generó la integración de aguacate en las fincas de café, cuya asociación modifica la composición florística y el manejo agronómico, ambos componentes son afectados por factores socioeconómicos, lo cual puede alterar

el aporte y reciclaje de material orgánico, y generar variaciones en la dinámica de C y N (Wicke *et al.*, 2013).

Montiel, Krishnamurthy, Vázquez *et al.* (2008) indican que un sistema agroforestal con café-aguacate-guayaba tiene una rentabilidad y productividad semejante a un monocultivo de aguacate, por lo que la asociación de café y aguacate podría ser una alternativa para contrarrestar el cambio total de los PTC a monocultivo de aguacate, cuyo manejo agronómico podría contribuir a mantener los almacenes de carbono y nitrógeno. Es por ello que el objetivo de la investigación fue identificar las variables socioeconómicas que modifican las características del manejo agronómico del sistema de producción aguacate-café y repercuten en el almacenamiento de C y N de los compartimientos de biomasa vegetal y suelo.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en Municipio de Huatusco, Veracruz (19° 10' 25" N y 96° 57' 30" O), a una altura promedio de 1300 msnm.

El clima es semicálido húmedo con precipitación y temperatura promedio anual de 2018 mm y 16.4 °C, respectivamente. Los suelos corresponden a Andosoles, los cuales se caracterizan por pH ácidos, altos contenidos de materia orgánica (MO) y nitrógeno (N) (Rosas *et al.*, 2008). La vegetación dominante es bosque de niebla o mesófilo de montaña y se manejan los cultivos de café, chayote, caña y naranja. Los cafetales de la región son manejados bajo sombra con las especies arbóreas de ixpepe (*Trema micrantha*), cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*), guarumbo (*Cecropia obtusifolia*), chalahuite (*Inga spp.*), cedro rojo (*Cedrela odorata*), roble (*Quercus xalapensis*) y nogal (*Junglans regia L.*), (Geissert *et al.*, 2017).

2.2. Diseño de muestra

Cuatro sistemas se seleccionaron como estudios de caso: sistema agroforestal con café renovado, sistema agroforestal con café manejado con limpieza y podas severas, sistema agroforestal con café y aguacate, y una huerta de aguacate como testigo. Los sistemas fueron evaluados durante el ciclo productivo 2018-2019. Las características de cada uno de los sistemas se presentan a continuación:

- 1) Sistema agroforestal con café renovado (SCR). Tenía 21 años de edad, con una renovación en filas intercaladas entre los cafetos antiguos. Esta renovación tiene tres años y se realizó con la variedad Geisha a un distanciamiento de 1 x 1 m. Las variedades de café (*Coffea arabica*) de 21 años son Típica, Bourbon, Costa Rica 95, Colombia, Garnica y Catuaí, y como componentes arbóreos tienen vainillo (*Inga spp*), grevillea (*Grevillea robusta*) y nogal (*Junglas spp*). Estas especies cumplen la función de proporcionar sombra a distanciamientos variables, desde 6 x 6 hasta 15 x 15 m, todas las plantas están sembradas en curvas en contorno. Este sistema cuenta con 4 000 plantas de café y 40 árboles ha⁻¹. El manejo

consistió en controlar las arvenses con azadón tres veces por año, un abonamiento con 5 kg de lombricomposta por planta y 1 t ha⁻¹ de cal agrícola, cada año, con podas anuales para los árboles de sombra. No se realiza control de plagas y enfermedades.

- 2) Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas (SCP). Este sistema tenía 21 años de edad en el momento del muestreo, con cuatro variedades de café (Bourbon, Típica, Colombia y Caturra) a un distanciamiento de 2 × 1.5 m, con vainillo (*Inga spp*), nogal (*Junglas spp*) como árboles de sombra con distanciamientos variables de 10 × 10 hasta 15 × 20 m, todas las plantas están sembradas en curvas en contorno. Este sistema cuenta con 2 400 plantas de café y 60 árboles ha⁻¹. Se realizó un abonamiento con 5 kg de lombricomposta y un kg de cal agrícola por planta, anualmente. El control de arvenses se realizó con azadón y las podas de los árboles de sombra con motosierra, tres veces por año. No se realizó control de plagas y enfermedades.
- 3) Sistema agroforestal café aguacate (SCA). Las plantas de aguacate tenían ocho años de edad y las de café dos años. La variedad de aguacate del sistema fue Hass con una densidad de 100 plantas ha⁻¹ a un distanciamiento de 10 × 10 m y las de café fueron Típica y Costa Rica con una densidad de 1 800 plantas ha⁻¹ con un distanciamiento de 2 × 2 m y entre las filas de aguacate. Todas las plantas están sembradas en curvas en contorno. Anualmente se aplica vermicomposta enriquecida con micorrizas se reincorporó con una dosis de 15 kg por planta de aguacate y 5 kg por planta de café. El control de arvenses se realizó con desbrozadora y las podas una vez por año con motosierra. El control de plagas y enfermedades se realizó con trampas de luz nocturna, trampas amarillas y aplicaciones de fungicida compuesto por Cu y Cal hidratada en dosis de un kg de cada uno en 100 L de agua (para 100 plantas de aguacate ha⁻¹). Las aplicaciones se realizaron una vez al mes; para el caso de cafetos no se realizó ningún control.
- 4) Sistema de monocultivo de aguacate (SMA). Las plantas de aguacate, variedad Hass, tenían ocho años de edad, con una densidad de 210 plantas ha⁻¹ y un distanciamiento de 6 × 8 m. Se realizaron tres fertilizaciones al año con NPK (17:17:17) y urea, 1.40 kg de cada uno por planta y tres veces al año. El control de arvenses y podas se realizó tres veces al año y se utiliza maquinaria. Para el control de plagas y enfermedades se aplicó RIDONIL (*Metalaxy Mancozel (64%) + metalaxil-M (4%)*) y *Thiametoxan + Lambdacialotrina* (ENGEO), trimestralmente con una dosis de 250 ml L⁻¹.

2.3. Variables socioeconómicas y de manejo analizadas en los sistemas agroforestales

Los cuatro sistemas se trataron como estudios de caso. La evaluación de 56 variables socioeconómicas se basó en las metodologías propuestas por Monterroso, Zizumbo, Zamorano *et al.* (2009) y Pérez y Garza (2013), cuyos parámetros y descripción de determinaciones se muestra en el Cuadro 1. Las variables fueron agrupadas en tres grupos en función de sus características: 1) económicas y de productividad (Cuadro 1.a); 2) sociales: tecnológicas,

educación, equidad, gestión y acceso (Cuadro 1.b); y 3) manejo agronómico (Cuadro 1.c). La información se obtuvo con entrevistas semiestructuradas, las cuales se realizaron durante el año 2018.

Cuadro 1 a. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo I

Área	Variable	Descripción de variable y metodología
Productividad ^(v)	Rendimiento de café en el sistema (P1)	Se tomó una muestra de cereza, en tres plantas de café por variedad y por tipo de sistema, con las cuales se determinó el número y peso promedio por cereza, para calcular el rendimiento por planta. Posteriormente se realizó la proyección a hectárea y se multiplicó por el valor en pesos mexicanos.
	Rendimiento de aguacate en el sistema (P2)	Se extrajeron cinco frutos por planta, en 10 plantas de aguacate por sistema, los cuales fueron pesados para estimar el rendimiento por planta y luego se realizó la proyección a hectárea.
	Calidad de cereza de café (P3)	Las muestras de cereza, fueron sometidas a una prueba de frutos vanos. Ésta consistió en incorporar las cerezas en un recipiente con agua y contabilizar que porcentaje de éstas flotaba, luego se separó las infestadas con broca, sobre maduras, muy verdes y las que presentaron otros daños físicos. El porcentaje de frutos defectuosos se multiplicó por el costo kg cereza ⁻¹ para determinar el valor monetario de las pérdidas ha ⁻¹ .
	Calidad de fruto de aguacate (P4)	Las muestras de aguacate que se utilizaron para (P2) fueron clasificadas según su peso para determinar su calidad, según la norma mexicana de calibre. El porcentaje de los frutos con calidad super se multiplicó por el precio durante el año 2018 y luego se proyectó a hectárea.
Costos de establecimiento ^(v)	Preparación de terreno (C1) y suelo (C2)	Se estimó en función de la cantidad de jornales utilizados para el desmonte, construcción de drenes, chapeo trabajos de subsolado, barbecho, rastreo, rastreo cruzado -rayado, y otras actividades realizadas durante la instalación de cada sistema.
	Plantas de café (C3), plantas de aguacate (C5)	Se calculó con el número de plantas, el cual fue multiplicado por el costo por planta de los viveros cercanos.
	Plantas de café renovadas (C4)	El número de plantas de café incorporadas para reemplazar plantas adultas cada 10 años, de acuerdo al criterio del productor fue multiplicado por el costo por planta de los viveros cercanos durante el año 2018.
	Mano de obra (M-O) para instalación de sistema (C6)	Se estimó en función del número de jornales empleados por el productor para sembrar determinado número de plantas.
	Costo de fertilizantes y abono(C7), insumos para control sanitario(C8) y para control de arvenses (C9)	La cantidad de insumos para abonar, control sanitario y arvenses, utilizados por planta y ciclo productivo fueron proyectados a hectárea y multiplicados por los precios del año 2018, según los viveros cercanos.
	M-O para aplicación de fertilizantes(C10), insumos para control sanitario(C11), arvenses (C12), labores culturales (C13).	Los costos de mantenimiento se estimaron en función del número de jornales empleados por el productor para aplicar los insumos a determinado número de plantas.
	Costo de servicio de motosierra (C14), riego con cisterna (C15), cosecha de café (C16) y aguacate (C17)	Costos de servicios o valorización de jornales empleados para el mantenimiento de las plantas de café y aguacate en los sistemas.
Económica ^(z)	Relación beneficio costo (E1)	Se determinó con la información de los gastos e ingresos, para cada sistema.
	Utilidad neta por ingresos de café (E2) y aguacate (E3)	Fueron calculados con el rendimiento de cerezas y frutos de aguacate, los ingresos y gastos.
	Diversidad de mercado: cantidad de compradores por año (E4)	Se sumó el número de compradores por ciclo productivo.

^(v) Las unidades fueron MXN ha⁻¹ N°, ^(z) la unidad fue número de compradores.

Cuadro1 b. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo II

Área	Variable	Descripción de variable y metodología
Tecnológica	Cantidad de capacitaciones recibidas al año. (T1).	Se calculó en función de las capacitaciones recibidas durante el periodo del 2016-2018 (#capacitaciones Año ⁻¹)
	Cantidad de tecnologías aplicadas en la finca(T2)	Se realizó un recorrido con el productor a toda la finca y se observó el número de tecnologías aplicadas (#tecnología)
Educación	Nivel de educación (S1)	Se consideró la clasificación de nivel de educación nacional. (1) básica: preescolar, primaria y secundaria; (2) Media: bachillerato, profesional técnico; (3) Superior: Técnico, superior, licenciatura y posgrado.
Equidad	Dependencia familiar (S2)	Cantidad de familiares que dependen de los ingresos de la finca (#personas)
	Nivel de dependencia de ingreso (S3).	Porcentaje de ingresos totales para gastos básicos (% del ingreso total)
	Mano de obra familiar (S4)	Número de familiares que participan en la mano de obra (#personas)
	Edad de personal que atiende la finca. (S12)	Se realizó en fusión de la escala de edad laboral proporcionada por INEGI. (1) 0-14: niños; (2) 15- 25: edad laboral temprana; (3) 25-54: edad laboral máxima; (4) 55-64: edad laboral madura; (5) 65 a más: edad avanzada.
Gestión	Vinculación (S5)	Número de afiliaciones para capacitarse en producción manejo y postcosecha, asistidas (#afiliaciones).
	Vinculación (S6)	Número de programas gubernamentales (#programas).
	Vinculación (S7)	Número de organizaciones a las que se afilió para comercializar (#organizaciones).
	Vinculación (S8)	Financiamiento a través de cooperativas (#financieras).
	Tipo de compradores (S9)	Tipo de comprador para café (cooperativa=COP=2, intermediario=INT=1 o consumidor final=CF=3).
	Tipo de propiedad (S10)	Finca o huerta propia=P=1 o rentada=R=2
	Tipo de organización (S11)	Se clasificó según el nivel de organización. Comunal=COM (1), Independiente=IND (2) o Asociación=ASOC (3)
Acceso	Dependencia de Mano de obra externa. (S13)	Porcentaje de servicios contratados para realizar actividades en los sistemas (%).
	Número de agroquímicos. (S14)	Se contabilizó el número de agroquímicos cercanos a los sistemas (#agroquímicos)
	Distancia de agroquímicos a parcela. (S15)	Se georreferenciaron las coordenadas de los agroquímicos cercanos a los sistemas y posteriormente se calculó la distancia de estos a cada sistema. (km).
	Tiempo de agroquímicos a parcela. (S16)	Se calculó el tiempo que tarda un productor en trasladar sus insumos a la parcela (Minutos)
	Disponibilidad de viveros con cafetos tolerantes a roya y productivos. (S17)	Se georreferenciaron las coordenadas de los agroquímicos cercanos a los sistemas y posteriormente se calculó la distancia de estos a cada sistema. (km).
	Disponibilidad de viveros con aguacate productivo y tolerante a los canchros. (S18)	Se georreferenciaron las coordenadas de los agroquímicos cercanos a los sistemas y posteriormente se calculó la distancia de estos a cada sistema. (km).
	Tiempo de vivienda a parcela (S19)	Se calculó el tiempo que tarda un productor en trasladarse de su vivienda al sistema. (Minutos).

Cuadro1 c. Caracterización de las variables utilizadas en el Grupo III

Área	Variable	Descripción de variable y metodología
Manejo agronómico	Cantidad de residuos de poda reincorporados. (M1)	Porcentaje de residuos incorporado en los sistemas por ciclo productivo. (%)
	Cantidad de residuos de cosecha reincorporados. (M2)	Porcentaje de residuos de pulpa de café incorporado en los sistemas por ciclo productivo. (%)
	Cantidad de podas al año (M3)	Número de podas realizadas al año y por hectárea. (#Podas ha ⁻¹)
	Cantidad de abono orgánico aplicado. (M4)	Número de aplicaciones de abonos orgánicos o sintéticos realizadas durante un año. Para obtener el promedio, se preguntó el número de aplicaciones durante el periodo del 2016-2018. (#aplicaciones año ⁻¹)
	Cantidad de abono sintético aplicado. (M5)	
	Densidad de planta de café (M6) y aguacate (M7)	La relación del número de plantas y el área total por sistema, proyectado a hectárea. (#Plantas ha ⁻¹)
	Densidad de otra vegetación (M8) y zona de amortiguamiento (M9).	Se calculó en función del número de plantas y el área que éstas ocuparon (% de área total).
	Diversificación de variedades de café. (M10)	Se realizó un censo de todas las plantas comprendidas en cada parcela evaluada (#variedades ha ⁻¹).

Las estimaciones de las variables económicas fueron analizadas para un periodo de 30 años, con una tasa de descuento de 10%. Para los costos de insumos se tomó como referencia los valores promedios de los agroquímicos y viveros cercanos durante el año 2018, y para los ingresos el valor promedio de venta obtenido por kg de cereza de café y fruto de aguacate. La metodología del análisis costo-beneficio (Gittinger, 1988) se utilizó para obtener el beneficio económico de cada uno de los sistemas agroforestales evaluados. Las variables sociales fueron determinadas con la entrevista en las parcelas, donde se contabilizaron las tecnologías utilizadas. Además, se tomó el tiempo y distancia de acceso a parcelas, se comprobó el grado de instrucción y capacidad de gestión de tiempos de cada uno de los productores.

2.4. Determinaciones de carbono y nitrógeno

Los contenidos de carbono en biomasa vegetal (CBV), fueron determinados mediante la suma del carbono almacenado en los árboles, arbustos, cafetos y raíces, mediante ecuaciones alométricas (Cuadro 2). Para ello se estimó la biomasa vegetal con evaluaciones de diámetros y altura de la vegetación en cada parcela por sistema. Luego se procedió a multiplicar la biomasa seca total por el factor 0.5 (Gallardo, 2017) para estimar la concentración de C. Para el caso de raíces se consideró la ecuación propuesta por Cairns, Brown, Helmer *et al.* (1997).

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de cada tipo de vegetación arbórea, cafetos y aguacate.

Tipo de vegetación	Ecuación alométrica	Autor
Biomasa aérea de <i>Junglas</i> spp	$Y^{\dagger} = -0.834 + 2.223 \times \text{log}_{10} (\text{DBH})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de <i>Inga</i> Spp	$Y = -0.889 + 2.317 \times \text{log}_{10} (\text{D})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de <i>Grevillea robusta</i>	$Y = -2.0082 + 2.3293 \times \ln(\text{DBH})$	Begazo & Jave (2018)
Biomasa aérea de <i>Coffee arabica</i>	$Y = -1.113 + 1.578 \times \text{log}_{10} (\text{D}) + 0.581 \times \text{log}_{10} (\text{H})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de avocado plants	$Y = \text{Log}(10^{(1.12 + 2.62 \times \text{log}_{10} (\text{D}) + 0.03 \times \text{log}_{10} (\text{H}))})$	Marín <i>et al.</i> (2016)

Y^{\dagger} = biomasa (kg), log_{10} = logaritmo en base 10, DBH = diámetro a la altura del pecho o a 1.30 m de altura, D = diámetro sobre los 15 cm, H = altura total de planta (m)

Los contenidos de carbono en el suelo (COS) fueron determinados en muestras tomadas por triplicado en cada una de las parcelas, en tres profundidades: 0-10, 10-20 y 20-30 cm. El COS se obtuvo por combustión usando el equipo *Shimadzu TOC-L*. Posteriormente se realizó la conversión a Mg C ha^{-1} con la fórmula propuesta por Ellert y Bettany (1995), quienes consideran la profundidad y densidad aparente del suelo, la cual fue previamente determinada con el método del cilindro (Page *et al.*, 1982).

El contenido de nitrógeno total en el suelo (NTS) se determinó en las mismas muestras de COS por el método de Kjeldahl (Nelson y Sommers, 1973).

2.5. Análisis de información

Todos los resultados de las variables sociales, económicas y de manejo corresponden a las proyecciones de un ciclo productivo de 30 años, y los valores de CBV, COS y NTS, al promedio de las determinaciones generadas por tres repeticiones para cada sistema.

El análisis de la influencia de las variables sociales con el MA y económicas con MA, para luego relacionarlas con las variaciones de los contenidos de C y N de los cuatro estudios de caso, se analizó con la metodología de componentes principales no lineal (ACP) con el software estadístico Statgraphics Centurion XVI, con tres componentes (los cuales explicaron el 100 % de la variabilidad total); se realizó un tratamiento de Listwise y una estandarización normal para los valores, bajo el enfoque de análisis multivariado no lineal que permite escalar las variables a diferentes niveles de medida y permitió las relaciones no lineales entre ellas.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Variables económicas, sociales y de manejo, en los sistemas

La variación de los costos de instalación y mantenimiento entre sistemas estudiados se muestra en el Cuadro 3. Los costos de instalación en SCR y SAC se asemejan a los costos promedios reportados por Escamilla (2021); mientras que en SCR y SMA, los costos son menores, esto se puede atribuir a que en SCR la densidad de siembra es menor y en el SMA las plantas de aguacate fueron

producidas *in situ*, cuya valorización se basó en mano de obra para el mantenimiento de las plantas en vivero. El costo total de mantenimiento en SCA se asemeja al promedio de 2 111.36 MXN ha⁻¹año reportado para sistemas de café y son menores que los costos de un monocultivo (Espinosa *et al.* 2016; Franco, Leos, Rodríguez *et al.* 2018). La relación beneficio costo para SCA superó al 20% del valor positivo de costo de oportunidad, por lo que se confirmó que la diversificación productiva en este sistema permite mayores ingresos (Pérez y Garza, 2014).

Cuadro 3. Variables económicas y de productividad en los cuatro sistemas estudiados.

Variable	SCR	SCP	SCA	SMA
P1+P2 (MXN ha ⁻¹)	55 230	25 200	170 040	316 112
P3+P4 (MXN ha ⁻¹)	3 684	1 973	58 752	134 347
C1 (MXN ha ⁻¹)	5 250	5 250	12 000	15 000
C2 (MXN ha ⁻¹)	2 250	1 500	3 000	3 000
C3+C4+C5† (MXN ha ⁻¹)	23 610	12 690	12 810	3 300
C6 (MXN ha ⁻¹)	14 550	12 300	13 500	6 300
Costo total de Instalación (MN\$ ha⁻¹)	45 660	31 740	41 310	27 600
C7 (MXNha ⁻¹)	913	362	201	731
C8 (MXN ha ⁻¹)	0	0	33	141
C9 (MXN ha ⁻¹)	0	0	17	153
C10+C11+C12+C13 (MXN ha ⁻¹)	1 205	2 125	482	1 659
C14 (MXN ha ⁻¹)	78	262	63	487
C15 (MXN ha ⁻¹)	0	0	45	0
C16+C17 (MXN ha ⁻¹)	1 514	2 263	1 525	616
Costo mantenimiento anual (MXN ha⁻¹)	3 707	5 012	2 366	3 787
E1(Sin unidad)	1.30	1.06	2.36	2.43
E2+E3(MXN ha ⁻¹)	4 714	4 336	12 710	6 380
E4 (N°compradores)	1	3	4	2

Las variables sociales S6, S7, S8 no reportaron valores, y S10, S14, S16 mostraron semejanzas (Cuadro 4), lo que indica que la vinculación entre los productores, programas de gobierno, las organizaciones de comercialización son escasos. El acceso a agroquímicos y tipo de propiedad muestra que los sistemas presentan las mismas condiciones de acceso y organización. Las demás variables corresponden al acceso a capacitaciones por parte de instituciones educativas aledañas, para la implementación de tecnologías que inciden en el manejo agronómico, y por tanto en la capacidad de inversión para contratar mano de obra externa y adquisición de insumos (Castillo, Rodríguez y López, 2015).

Cuadro 4. Variables sociales en los cuatro sistemas estudiados

Variable	Unidad	SCR	SCP	SCA	SMA
T1	Número de capacitaciones por año	2	1	2	2
T2	Número de tecnología	2	1	3	1
S1	Sin unidad	1	1	2	1
S2	Número de personas	2	4	4	4
S3	Porcentaje del ingreso total	50	40	80	100
S4	Número de personas	2	3	2	2
S5	Número de afiliaciones	1	1	2	1
S6	Número de programas	0	0	0	0
S7	Número de organizaciones	0	0	0	0
S8	Número de financieras	0	0	0	0
S9	Sin unidad	3	1	1	1
S10	Sin unidad	1	1	1	1
S11	Sin unidad	1	1	2	1
S12	Sin unidad	4	4	4	5
S13	Porcentaje	5	5	10	10
S14	Número de agroquímicos	4	4	4	4
S15	Kilómetros	7.5	7.5	4.4	4.4
S16	Minutos	15	15	15	15
S17	Kilómetros	25	25	20	0
S18	Kilómetros	0	0	40	40
S19	Minutos	15	15	10	10

Las variables del Grupo III (Cuadro 5) muestran que la alta densidad de siembra en el SCR (4000 plantas ha⁻¹) y la cantidad de variedades de café, demanda mayor manejo agronómico. El SCA presentó valores intermedios entre SMA y los demás sistemas, lo que indica que la composición florística es una variable que genera diferentes arreglos topológicos y estratos, y por tanto diferentes tipos de manejo agronómico (Sánchez *et al.*, 2018).

Cuadro 5. Variables de manejo agronómico en los cuatro sistemas estudiados

Variable	Unidad	SCR	SCP	SCA	SMA
M1	Porcentaje	100	0	100	0
M2	Porcentaje	20	0	0	0
M3	Número de podas. ha ⁻¹	3	5	3	2
M4	Número de aplicaciones. año	2	2	1	0
M5	Número de aplicaciones. año	0	0	0	2
M6	Número de pPlantas.ha ⁻¹	4000	1800	1800	0
M7	Número de plantas. ha ⁻¹	0	0	100	275
M8	Número de plantas. ha ⁻¹	50	30	20	0
M9	Porcentaje de área total	10	15	25	0
M10	Número de variedades. ha ⁻¹	4	2	2	0

3.2. Contenidos de carbono y nitrógeno en los sistemas

Los resultados de C y N (Cuadro 6) indican que en SCA los valores de concentración de CBV se encuentran dentro del rango promedio de 33.3 a 43.69 Mg C ha⁻¹ para cafetales; el COS reportó valores inferiores a cafetales tradicionales (211.7 Mg C ha⁻¹) pero superiores a los cafetales comerciales (92.6 Mg C ha⁻¹); mientras que el NTS se asemeja al promedio de PTC 14.15 Mg N ha⁻¹; de acuerdo con lo reportado por Masuhara *et al.* (2015) y Cristóbal *et al.* (2019). En promedio el SCP los bajos valores de CBV se atribuyen a las podas severas. Los demás sistemas muestran el mismo comportamiento para CBV que SCA y los valores de las concentraciones de COS y NTS tienden a ser menores que los sistemas de cafetales comerciales.

Cuadro 6. Contenidos de carbono y nitrógeno en Mg ha⁻¹ por sistema en biomasa vegetal y suelo.

Variable	SCR	SCP	SCA	SMA
Contenido total de C en biomasa vegetal (CBV)	39.6	15.9	36.1	36.9
Contenido total de C en el suelo (COS)	60	71	139	74
Contenido de N total en suelos (NTS)	4.9	5.6	11.8	7.2

3.3. Relación entre las variables económicas y de productividad, y el manejo agronómico

Las variables de los componentes 1 y 2 explica el 83.11 % de la variación de las variables manejo agronómico (Figura 1a), donde se agrupan las variables de inversión en mano de obra, rendimiento y plantas, con un peso de 50.85% en el componente 1; y las variables de inversión en insumos de mantenimiento con 32.26% en el componente 3. Este resultado concuerda con lo reportado por Cruz Aguilar, Leos Rodríguez, Uribe Gómez, *et al.* (2016), quienes indican que la inversión es importante para generar beneficios económicos, ya que estos influyen de manera positiva en manejo agronómico, contribuye a la productividad y por tanto a los ingresos que se generen en los sistemas (Jezeer, Santos, Bota,

et al., 2018). Del mismo modo, las variables C7, C8, C9 y C14 confirman que la inversión en el manejo agronómico influye en la producción de aguacate y café (P1+P2), comportamiento que según Martinelli, Schindwein, Padovan *et al.* (2019) permite obtener sistemas diversificados, los cuales generan ingresos en diferentes momentos y por tanto se tiene la capacidad de invertir en diferentes periodos, característica que permite la programación del manejo agronómico, mientras que, el 16.84 % adicional de la variación en el manejo agronómico se explica por las variables de inversión en servicios esporádicos y la diversidad de mercados (componente 3). Por tanto, la variación del manejo agronómico está relacionado con mayor peso porcentual a las variables económicas que corresponden a la capacidad de inversión para la instalación de plantas y los costos de inversión en mano de obra, lo cual influye en el rendimiento o producción de los sistemas (Martinelli *et al.* 2019).

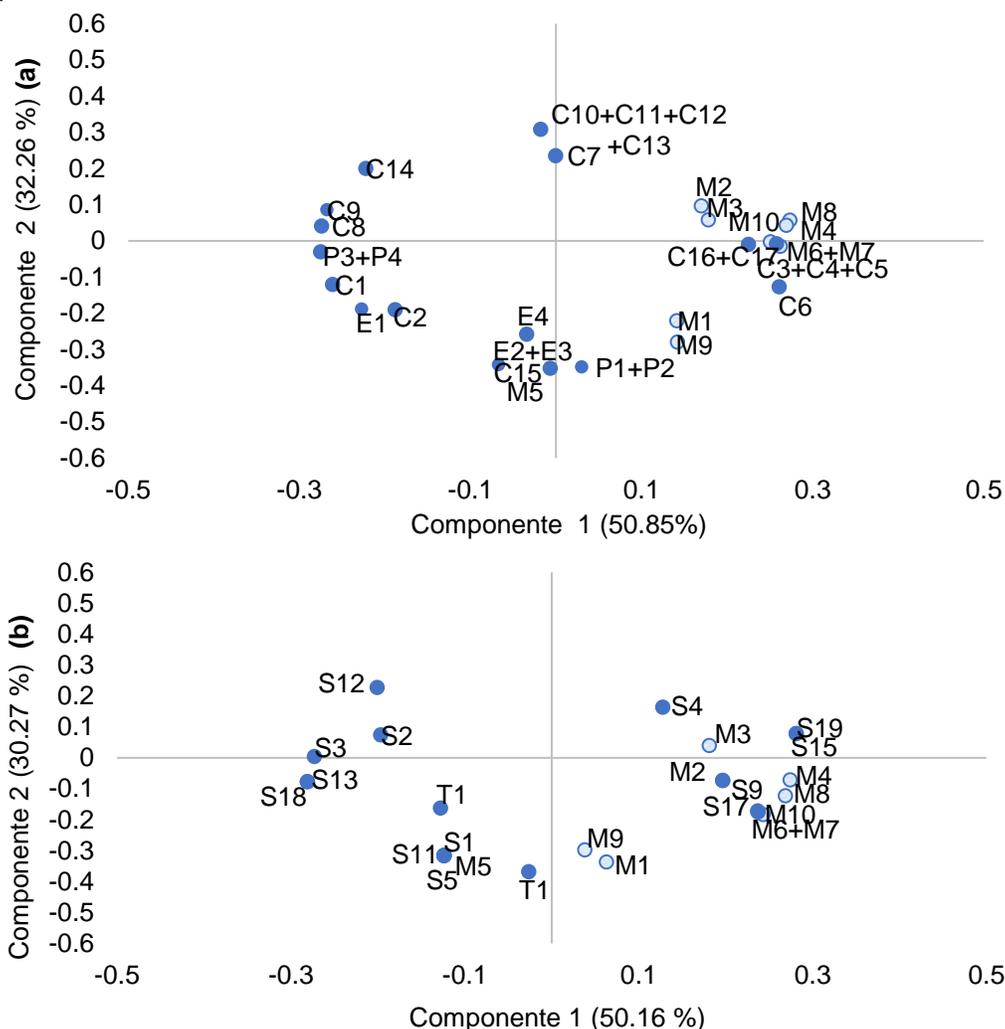


Figura 1. Análisis de componentes principales (ACP). a) Variables económicas y de productividad; b) Variables sociales. Las variables S6, S7, S8, S10, S14 y S16 no se consideraron debido a que no reportaron valores o fueron semejantes entre los sistemas.

3.4. Relación entre las variables sociales y el manejo agronómico

Las variables sociales explican el 80.43 % de la variación del manejo agronómico de acuerdo con los Componentes 1 y 2 (Figura 1b), donde las variables sociales que corresponden al acceso de recursos materiales y recurso humano para el mantenimiento del sistema se agrupan en el componente 1 con el 50.16%, y las variables de necesidades económicas con 30.57 % en componente 2. Estos resultados indican que las variables de manejo son sensibles al acceso y mano de obra familiar puesto que a partir de éstas el productor toma decisiones para el manejo agronómico del sistema (Ordóñez, Estrada y Possú, 2019) lo que afecta la producción de café y/o aguacate. Asimismo, la edad del productor puede influir en la mano de obra para el mantenimiento, lo que concuerda con lo mencionado por Pocomucha, Alegre, Abregú (2016) quienes indican que tanto la mano de obra familiar como la edad laboral del productor influyen en el manejo de arvenses y por tanto generan limitaciones en el manejo de los sistemas. Por otro lado S9 influye en la cadena productiva, la cual, según Figuerora (2016), genera capacidades en los productores para invertir en diversos insumos que permiten un equilibrio ecológico; mientras que las variables S1, S11 y S5 explican un 19.57% adicional de la variación del manejo agronómico; éstas variables están relacionadas con el acceso a recursos de educación.

La mayor variación del manejo agronómico se observó en el componente 1, lo que indica que las variables sociales que están relacionadas con el acceso a recursos materiales y recurso humano influyen en la capacidad del productor para programar el uso de insumos y administración de mano de obra, y por tanto en el manejo agronómico (Ordóñez *et al.*, 2019).

3.5. Relación entre los contenidos de carbono, nitrógeno, y las variables de manejo agronómico

Todas las variables de manejo agronómico que mostraron correlación positiva (M1, M2, M3, M4, M6, M7, M8, M9 y M10) con las variables sociales y económicas, generan el 78.40 % de la variación de CBV de acuerdo a los valores de los Componentes 1 y 2 (Figura 2a). Adicionalmente el COS mostró una relación inversa con todas las variables de manejo agronómico, lo cual demuestra que las reservas de carbono en el suelo son más sensibles que las de biomasa vegetal ante el manejo agronómico, porque se generan variaciones en el almacenamiento de C durante el ciclo de producción de residuos orgánicos (Wicke *et al.*, 2013). Además, los almacenes de C en el suelo dependen del reciclaje de material muerto que se genera por la biomasa vegetal, y este puede variar con la introducción de aguacate en el sistema, lo que explica la correlación inversa con el manejo agronómico y confirma que los valores de COS del SCA se deben a la incorporación de vermicomposta (Nair *et al.* 2015).

Las variables M1, M6+M7, M9 y M10 explican el 81.02 % de la variación del contenido de NTS, de acuerdo con los valores de los Componentes 1 y 2 (Figura 2b). Estos resultados indican que la diversificación de la composición florística contribuye a la fijación de nitrógeno a través del reciclaje de residuos orgánicos, lo que concuerda con Sharma, Sharma y Sharma (2009) quienes indicaron que los niveles de N en el suelo dependen de la cantidad de biomasa vegetal

reciclada; Ordóñez *et al.* (2019) confirman que el manejo con estratos diversificados promueve condiciones edafoclimáticas que influyen en el reciclaje de diversos materiales orgánicos y por tanto en las variaciones de NTS.

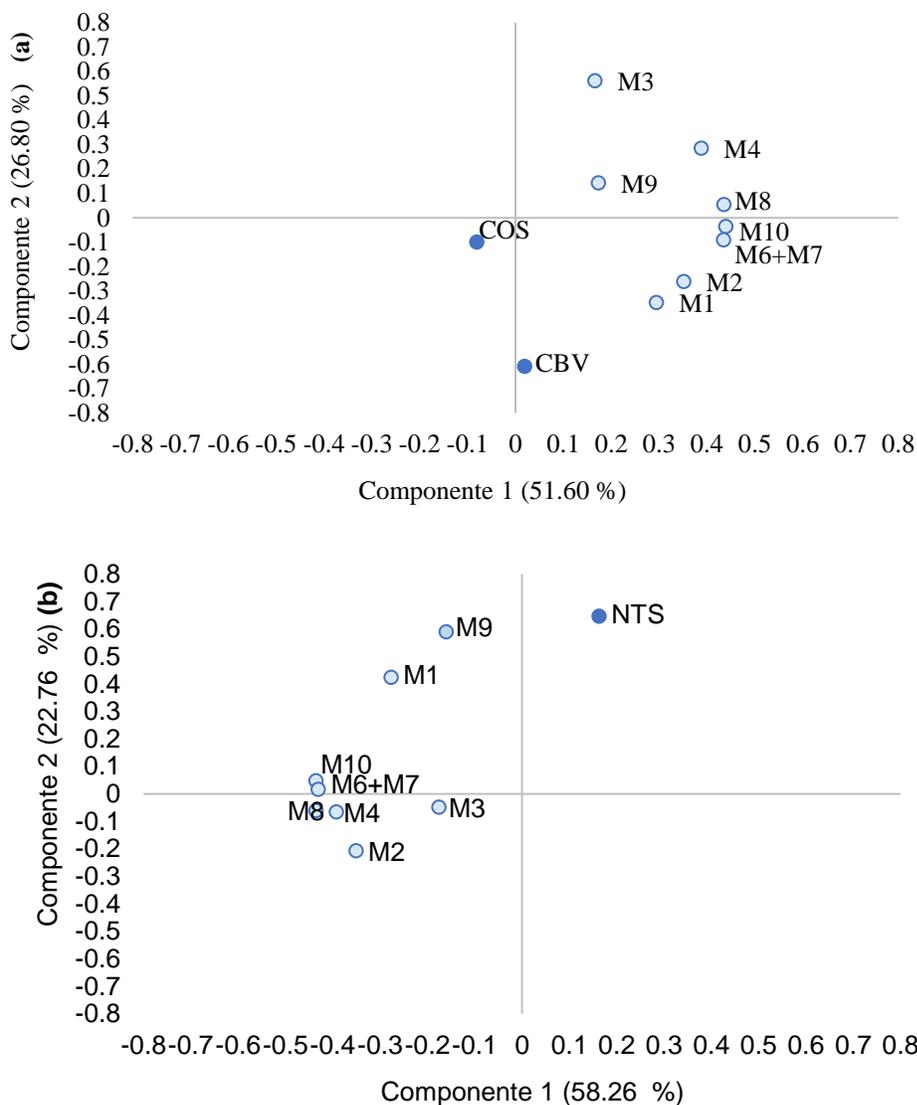


Figura 2. Análisis de componentes principales. (a) variables de MA y carbono (b) variables de MA y nitrógeno. La variable M5 no fue considerada para el ACP debido a que no presentó relación entre las variables socioeconómicas.

4. Conclusiones

Las variables sociales, acceso a la capacitación, capacidad para la organización, mano de obra, nivel de educación y tipo de compradores, las variables económicas, costos por inversión en abonos, control de arvenses, sanitario y servicios para el mantenimiento, fueron las que explicaron la variación del manejo agronómico en los sistemas estudiados.

La variación del manejo agronómico en el sistema SCA es sensible a las variaciones de inversión en insumos esporádicos, diversidad de mercado y acceso a recursos de educación, variables que afectaron al manejo con la incorporación de material orgánico externo generado por abonos orgánicos y por tanto explican las variaciones en los contenidos de N en el sistema, CBV y COS mientras que los contenidos de C acumulado en el sistema no fueron afectados por las variables de manejo agronómico.

El manejo agronómico del SCA permite mantener los almacenes de CBV y COS, con valores superiores a los cafetales comerciales y valores de NTS semejantes a los policultivos tradicionales de café, pero superiores en COS.

5. Literatura citada

- Bautista, E. A., Gutiérrez, E.V., Ordaz, V.M., Gutiérrez, Ma. Del C., Cajuste, L. (2018). Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: Identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Revista Terra Latinoamericana*. 36, pp 261-273.
- Begazo, K., and Jave, J. (2018). Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en especies arbóreas de Lima, Perú. *Rev. For. Perú*. 33(1), pp 76 -90.
- Cairns, M. A. *et al.* (1997) Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, pp 1-11.
- Castillo, M., Rodríguez, C, López, R. (2015). Contexto institucional e impactos socioeconómicos y ecológicos de la agricultura orgánica en la caficultura tradicional, municipio Andrés Bello, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 56 (2), pp 163-183.
- Cristóbal, D., Tinoco, J.A., Prado, J.V. and Hernández, E. (2019). Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry, and coffee monoculture systems. *Rev. Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 25(2), pp 169-184. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.070>.
- Cruz Aguilar, R., Leos Rodríguez, J.A., Uribe Gómez, M., Rendón Medel, R. (2016). Evaluación financiera y socioeconómica del sistema agroforestal tradicional café-plátano-cítricos en Tlapacoyan, Veracruz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7 (SEP 16), pp. 3287-3299. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.397>
- Ecamilla, E. (2021). Especialista en Sistemas Agroforestales y Cafecultura. Secretaria de Bienestar, México. Comunicación e intercambio de conocimientos. Realizada 29 de Marzo, 2021. México.
- Espinosa, J. A., Uresti, J., Vélez, A., Moctezuma, G., Uresti, D., Góngora, S.F., Inurreta, H. (2016). Productividad y rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), pp 2011-2024.

- Ellert, B. H.; Bettany, J.R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), pp 529–538.
- Fernández, P.R., Acevedo, D.C., Villanueva, A., Uribe, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 35(7), pp 65-77.
- Figuerora, O. A. F. (2016). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de café en fincas-hogar del Sector San José, Municipio de Linares-Nariño. *Tendencias*, 17(2), pp 11-125.
- Franco, M. A., Leos Rodríguez, J.A., Salas, J.M., Acosta, M. y García, A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), pp 391-403. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1080>
- Galindo, Ma. E., Milagro, P. A., Alejandre, J. A., Leyva, O.R., Landero, I., Lee, H., Murguía, J. (2011). Relaciones genéticas del aguacate (*Persea americana* Mill.) en siete municipios del centro de Veracruz, caracterizadas con microsatélites. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13 (3), pp. 339-346. Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México.
- Gallardo, J. F. La materia orgánica del suelo; residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Gallardo, J.F (ed). Universidad Autónoma Chapingo. México, 2017. 424 p.
- Geissert, D., Mólgora, A., Negtete, S., and Hunter, R. (2017). Effect of vegetation cover management on water erosion in shade coffee plantations. *Agrociencia*, 51(2), pp 119-133.
- Gittinger, J. P. (1982). Economic analysis of agricultural projects. 2. ed. John Hopkins University Press, Maryland, 65–70pp.
- Granados, R., Medina, Ma. P., Peña, V. (2014). Variación y cambio climático en la vertiente del Golfo de México: Impactos en la cafecultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), pp 473-485.
- Jezeer, R. E, Santos, M.J., Bota, G.A., Junginger, M., Verweij, P.A. (2018). Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agricultural Systems*, 162, pp 179-190. Doi: 10.1016/j.agsy.2018.01.014
- Marín, Q., Andradæ, H.J., and Sandoval, A.P. (2016). Fijación de carbono en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *U.D.C.S Actualidad & Divulgación Científica*, 19 (2), pp 352 – 360.
- Martinelli, G. do C., Schindwein, M.M., Padovan, M.P., Gimenes, R. M. T. (2019). Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil. *Land Use Policy*, 80, pp, 274-286

- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E. S., Juárez, M.J., Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), pp. 66-93.
- Moguel, P., Toledo, V. (1999). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 1 (13), pp. 11-21.
- Monterroso, N., Zizumbo, L., Zamorano, S., Monterroso, P., Gómez, M.A. (2009). Espoleando la esperanza. Evaluación social de la sustentabilidad en dos comunidades rurales del Estado de México. Monterroso, N., Zizumbo, L., Zamorano, S., Monterroso, P., Gómez, M.A (eds). Universidad Autónoma del Estado de México. México, 199p.
- Montiel, G., Krishnamurthy, L., Vázquez, A., Uribe, M. (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 26(1), pp 85-90.
- Nair, R., Mehta, C. R., Sharma, S. (2015). Carbon sequestration in soils - A Review. *Agricultural Reviews*, 36, pp 81-99.
- Nelson, D.W; Sommers, L.E. (1973). Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal*, 65, pp 109-112.
- Ordóñez, H. R. O.; Estrada, J. F. N.; Possú, W. B. (2019). Tipificación de sistemas de producción de café en La Unión Nariño, Colombia. *Temas Agrarios*, 24(1), pp 17-26
- Page, A.L.; Miller, R.H.; Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Physical Properties Second Editions. Madison, Wisconsin, USA, 1159 p.
- Pérez, V., Garza, G. (2013). Evaluación de la sustentabilidad del sistema de manejo de café orgánico en la unión de ejidos Majomut, región de los Altos de Chiapas. En: Maser, O.; López, S. (Eds). *Sustentabilidad y Sistemas campesinos: Cinco experiencias de evaluación en el México rural*. Mundi-Prensa México, 45-81 pp.
- Pineda, Ma.R.; Ortiz, G.; Sánchez, L.R. (2005). Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques*, 11 (2), pp 3- 14.
- Pocomucha V. S.; Alegre, J.; Abregú, L. (2016). Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15(2), pp 107-114.
- Rojas-García, F., Santoyo-Gómez, G.H., Gonzáles-Montiel, E., Velazqués-Rodríguez, A., Pulido-Ponce, J. I. (2017). La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(2), pp. 69-96.
- Rosas, J., Escamilla, E., Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales de café orgánico. *Terra Latinoamericana*. 26(4), pp 375 - 384
- Ruelas, L. C., Nava, M. E., Cervantes, J., Barradas, V. L. (2014). Importancia

ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20, (3), pp. 27-40.

Sánchez-Hernández, S., Escamilla-Prado, E., Mendoza-Briseño, M.A., Nazario-Lezama, N. (2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *AgroProductividad*, 11 (4), pp. 80-86.

Segura, M., Kanninen, M., and Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agrofor. Syst.* 68(2), pp 143-150. doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>.

Sharma, G., Sharma, R., Sharma, E. (2009). Impact of stand age on soil C, N and P dynamics in a 40-year chronosequence of alder-cardamom agroforestry stands of the Sikkim Himalaya. *Pedobiología*, 52(6), pp 401-414.

Suárez, M. G., Campos, C. A., Cruz, H. L. (2015). Dinámica del carbono y nitrógeno del suelo en ecosistemas de la costa tropical seca, en la mancha (CICOLMA), Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(3), pp 347-361.

Wicke, B., Smeets, E., Razzaque, A., Stille, L., Ranjay, K., Rasul, A., Mahmood, K., Faaij, A. (2013). Biomass production in agroforestry and forestry systems on salt-affected soils in South Asia: Exploration of the GHG balance and economic performance of three case studies. *Journal of Environmental Management*, 127, pp 324-334. doi: 10.1016 / j.jenvman.2013.05.060

CAPÍTULO IV. VARIACIÓN DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO Y LA DINÁMICA DE CARBONO Y NITRÓGENO EN SISTEMAS AGROFORESTALES MODIFICADOS EN VERACRUZ, MÉXICO

Resumen

Los sistemas agroforestales de café en las zonas de mayor altitud de Veracruz, México, están siendo desplazados por monocultivos de aguacate debido a su alto valor económico. Este cambio puede generar alteraciones en el tipo de residuos orgánicos y en la actividad biológica. Esta actividad es un indicador de la calidad del suelo, sensible a variaciones climáticas, cambios en la composición florística y el manejo agronómico. Esta puede ser evaluada a través de la respiración y de la macrofauna, del suelo, ambas relacionadas con la dinámica de carbono y nitrógeno. El objetivo de esta investigación fue analizar la variación de la actividad biológica del suelo y su impacto en la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café modificados. Se compararon tres sistemas agroforestales de café (renovado, poda intensiva, introducción de aguacate) y un monocultivo de aguacate. Las evaluaciones se realizaron durante el periodo de 2017 a 2019. Se midieron parámetros edáficos, respiración, macrofauna, carbono y nitrógeno, en el suelo y carbono en biomasa vegetal, en parcelas de 25 x 25 m y tres profundidades de suelo, por triplicado. Para analizar el impacto en la dinámica de C y N se realizó la prueba de *Spearman* y un análisis de componentes principales para determinar la estructura de dependencia. El sistema con introducción de aguacate presentó los valores más bajos de respiración del suelo con $193 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la profundidad de 0-10 cm y no presentó macrofauna del suelo. La relación C/N fue sensible a la introducción del aguacate. La correlación entre respiración del suelo y los parámetros relacionados con la hojarasca fue positiva, pero negativa con la materia orgánica y nitrógeno total del suelo, lo que explica el 67,7 % de la variación. La modificación de un sistema agroforestal de café genera variaciones en la actividad biológica y los contenidos de carbono y nitrógeno del suelo.

Palabras clave: CO₂ del suelo, emisiones, macrofauna, relación C/N, almacenes de C

Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Diana Ayala Montejo

Director de Tesis: Dr. Eduardo Valdés Velarde

1. Introducción

Los sistemas agroforestales de café (SAFC) tienen una distribución de 730 011 hectáreas en México (SAGARPA, 2017), pero los bajos precios y los problemas sanitarios ocasionados por *Hemileia vastatrix* (Villers *et al.*, 2009 y FIRA, 2016) han presionado a los productores por el abandono de la producción o a la búsqueda de otros productos agrícolas que permitan mejorar sus ingresos económicos. Para ello se han probado nuevos manejos de los cafetales, incluyendo nuevas variedades, una de ellos es el aguacate, el cual se intercala en los cafetales o sustituyen totalmente a los antiguos SAFC, por su atractivo precio en el mercado nacional e internacional (Franco *et al.*, 2018), lo cual genera el desplazamiento de los SAFC por monocultivos de aguacate. Actualmente, existen estudios sobre el efecto de la introducción del aguacate para aumentar la rentabilidad de los SAFC (Montiel *et al.*, 2008); la alta demanda de nutrientes y agua que se requiere cuando es manejado como monocultivo, debido a que genera el agotamiento del recurso agua y la contaminación del suelo por la aplicación de diversos fertilizantes, lo cual genera un impacto negativo al ambiente donde se desarrolla (Rendon, 2013); sin embargo, los efectos en el suelo y la dinámica de carbono y nitrógeno, todavía no han sido reportados.

Los sistemas agroforestales de café en México se caracterizan por su alta diversidad florística; sin embargo, los daños fitosanitarios causados por la roya (*Hemileia vastatrix*), que afecta el rendimiento, están llevando a la integración del aguacate, el cual es un cultivo que demanda un alto porcentaje de luz dentro de los SAFC; por lo tanto, se generan cambios en la densidad de plantación de café, el manejo y la composición florística; estos cambios pueden afectar tanto el tipo de vegetación como las interacciones que ocurren entre las especies de plantas, generando diferentes cantidades y calidad de residuos orgánicos, afectando así la actividad biológica del suelo (Vallejo, 2013).

La actividad biológica se puede analizar a través de la respiración del suelo (RS), la cual es el segundo flujo de carbono (C) más importante en la atmósfera, lo que la convierte en una parte importante de la dinámica del C en los sistemas terrestres; la RS está conformada por la respiración autótrofa (raíces) y heterótrofa (micorrizas y microorganismos del suelo que descomponen los residuos orgánicos) (Ryan & Law, 2005); esta última es importante porque los procesos de descomposición y mineralización de los residuos orgánicos (RO) liberan CO₂, siendo su intensidad muy sensible al contenido de C y N de los RO generados por los sistemas, a la temperatura y humedad ambiental y a la naturaleza de la materia orgánica del suelo (MOS). La RS heterótrofa se asocia con la respiración de las comunidades microbianas que utilizan los RO como energía para llevar a cabo todos sus procesos metabólicos (Giardina, Binkley, Ryan *et al.*, 2004); sólo el 10% de la RS resulta de la descomposición de los compuestos de carbono más transformados y recalcitrantes englobados bajo el término de sustancias húmicas, es decir, que han sido sometidos a un proceso de humidificación que los hace bioestables (Gallardo, 2017). La RS heterótrofa también está vinculada a la macrofauna edáfica, ya que ésta fragmenta y desintegra los RO, aumentando su superficie específica que favorece el ataque

microbiano y, por tanto, las emisiones de CO₂ (Gallardo, 2017). Este ataque microbiano se evidencia por las correspondientes emisiones de CO₂ durante los procesos de degradación, descomposición o mineralización de los RO (Thiele, Bloem, de Vries *et al.*, 2012), que se incorporan posteriormente al suelo, contribuyendo al ciclo del C, al retorno del CO₂ a la atmósfera y a la disponibilidad de nutrientes inorgánicos, principalmente nitrógeno, influyendo así también en su dinámica.

La actividad biológica puede utilizarse como parámetro para analizar el ciclo del C (Xu, Shi, Chen *et al.*, 2016), ya que existe una estrecha correlación entre la RS y el carbono orgánico almacenado en el suelo (COS). Por otro lado, la densidad de la vegetación, las propiedades del suelo, el manejo agronómico y el tipo de sistema afectan directamente a la respiración del suelo (Zhou, Wang and Luo, 2018), que está relacionada con el proceso de descomposición de la MOS y, por lo tanto, con su relación C/N, que refleja su calidad (Gallardo, 2017); con frecuencia, cuando la respiración es baja, es porque esta relación suele ser alta, lo que da lugar a suelos deficientes en nutrientes (Hedo, Lucas, Wic *et al.*, 2015).

Como se ha indicado anteriormente, la relación C/N tiene una relación inversa con el proceso de mineralización de N incluido en los RO que se integran en el suelo; en consecuencia, una relación C/N alta de los RO produce poco amonio y nitrato en el suelo. La producción de N inorgánico del suelo (SIN = NH₄⁺+NO₃⁻) puede variar debido a la composición florística de los sistemas, el clima y los tipos de manejo; generalmente, se generan mayores cantidades de SIN en los sistemas naturales que en las tierras de cultivo (Zhou *et al.*, 2018).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, este capítulo tuvo como objetivo analizar la variación de la actividad biológica del suelo y su impacto en la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café modificados con: (1) la renovación de variedades de cafetos tolerantes a roya, (2) limpieza severa y (3) introducción de aguacate; con un monocultivo de aguacate como testigo; los cuales fueron comparados entre sí, con el fin de comparar las emisiones de CO₂ emitidas por la respiración del suelo y la macrofauna del suelo, generadas por la actividad biológica del suelo y su repercusión en los contenidos de carbono y nitrógeno en los diferentes compartimientos de los sistemas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El experimento se realizó en el municipio de Huatusco de Chicuellar, Veracruz (19° 10' 25,00" de latitud norte y 96° 57' 30,00" de longitud oeste), a una altura promedio de 1300 msnm.

El clima es semicálido húmedo con abundantes precipitaciones, siendo la temperatura media anual de 16,4 °C y la precipitación de 2018 mm año⁻¹. Los sistemas agroforestales estudiados se encuentran generalmente en ambientes con relieve montañoso y húmedos.

Los suelos dominantes en el área de estudio han sido clasificados como Andosoles; sus perfiles se caracterizan por la acumulación de complejos órgano-

minerales (WRB, 2009); estos suelos se caracterizan por un color negro, una textura franco-arenosa, un pH fuertemente ácido (4,7 en promedio), y altos contenidos de materia orgánica del suelo (5,9%) y nitrógeno total (0,4%) (Rosas, Escamilla y Ruíz, 2008).

2.2. Descripción de los sistemas estudiados

2.2.1. Sistema agroforestal de café renovado (SCR). Este sistema es manejado con 4 000 plantas de café ha⁻¹, con una altura y diámetro promedio de 0.65 y 0.013 m, respectivamente, y 60 árboles de sombra por ha⁻¹, estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp, *Inga* spp y *Grevillea robusta*, con una altura y diámetro promedio de 12.27 y 0.0985 m, respectivamente. La fertilización se realiza con 5 Kg de composta (materia seca) por planta de café, esta composta es previamente enriquecido con residuos de pulpa de café en una proporción de 100 kg de pulpa por tonelada de composta. Se aplica 8 toneladas de cal agrícola ha⁻¹ cada tres años, antes de la renovación y desde hace 10 años. El sistema tiene 21 años de edad sin agregar agroquímico y no realiza control de plagas y enfermedades. El control de arvenses se realiza manualmente con azadón.

2.2.2. Sistema agroforestal de café con podas intensivas (SCP). Este sistema es manejado con 2 400 plantas de café ha⁻¹, con una altura y diámetro promedio de 2.85 y 0.0251 m, respectivamente, y 40 árboles de sombra por ha⁻¹, estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp and *Inga* spp., con una altura y diámetro promedio de 11.89 y 0.253 m, respectivamente. La fertilización se realiza anualmente con 5 Kg de vermicomposta (materia seca) por planta de café. Está vermicomposta es enriquecida con residuos de la pulpa de café en una proporción 10:1. Se aplica 1 Kg de cal agrícola por planta de café. La densidad de sombra es controlada con podas severas, no se realiza control de plagas y enfermedades, y el control de arvenses es semi-mecanizado. El sistema fue instalado hace 21 años.

2.2.3. Sistema agroforestal de café con introducción de aguacate (SCA). Este sistema es manejado con 1 800 plantas de café y 100 plantas de aguacate ha⁻¹, con cinco árboles de sombra intercalados de diversas especies por ha⁻¹. Lo árboles de aguacate tiene una altura y diámetro promedio de 11.7 cm y 3 m, respectivamente, y las plantas de café, 1 cm y 1.6 m, respectivamente. La fertilización consiste en aplicar vermicomposta enriquecida con micorrizas (un kg de micorrizas por 500 kg de vermicomposta), está es aplicada a una dosis de 15 kg (materia seca) por planta de aguacate y cinco kg (materia seca) por planta de café, anualmente. Adicionalmente, se incorpora “microorganismos eficientes” (ME), este producto contiene 4.2 % de ácidos húmicos y 0.5 % de ácidos fúlvicos, los cuales contienen: 1.3 % N; 1.2 % P; 2.4 % K; 2.2 % de Ca; 1.7 % Mg; 0.02 % Mn; y 0.02 % B. Estos ME son aplicados a nivel foliar, mensualmente, en dosificaciones de un litro de ME por 200 litros de agua

(esté volumen abastece a 50 plantas de aguacate y 900 cafetos). El control de plagas y enfermedades se realiza con trampas de luz nocturna, trampas amarillas y aplicaciones de fungicida compuesto por Cu y Cal hidratada en dosis de un kg de cada uno en 100 L de agua (para 100 plantas de aguacate), las aplicaciones se realizan una vez al mes; para el caso de cafetos no se aplican insumos. El control de arvenses es mecanizado con desbrozadora. El sistema tiene 8 años de instalado.

2.2.4. Monocultivo de aguacate (SMA). Este sistema se consideró como testigo, está conformado por 210 plantas de aguacate por ha⁻¹, las plantas tienen una altura y diámetro promedio de 3 m y 18.5 cm, respectivamente. La fertilización se realiza con agroquímicos que contienen N:P:K (17:17:17) y urea, se aplica 1.4 Kg de cada producto por planta, tres veces por año. Para el control de plagas y enfermedades se aplica *RIDONIL* (Metalaxy Mancozel (64%) + metalaxil-M (4%)) y *Thiametoxan* + *Lambdacialotrina* (*ENGEO*), una dosis de 250 ml L⁻¹ cada trimestre. El control de arvenses es con desbrozadora (mecanizado). El sistema tiene 8 años de instalado.

2.3. Diseño experimental

Para los análisis de suelos se aplicó un diseño factorial compuesto por cuatro sistemas y tres profundidades. En cada sistema se delimitaron tres parcelas de 25x25 m², correspondientes a las réplicas, donde se tomaron muestras de suelos a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y de hojarasca o residuos orgánicos, por triplicado. A estas muestras se les realizó el análisis de respiración del suelo, macrofauna del suelo *in situ* y los contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo. En cada parcela se realizaron evaluaciones dasométricas (diámetro y altura) a todas las especies de árboles y cafetos, luego a través de ecuaciones alométricas se realizaron las estimaciones de carbono en la biomasa vegetal (PBM), para ello se consideró un arreglo de tres parcelas distribuidas al azar en cada tipo de sistema. La recolección de muestras y las evaluaciones se realizaron en octubre de 2017, 2018 y 2019.

2.4. Determinaciones de la respiración del suelo (RS)

Las muestras de hojarasca de cada parcela se separaron en tejidos vegetales delgados (menos de 1.0 mm de diámetro) y gruesos (más de 1.0 mm de diámetro), y las muestras de suelo provenientes de las tres profundidades (recolectadas por triplicado); de las cuales se tomaron 10 g (masa seca) y se incorporaron en recipiente de plástico hermético para realizar las respectivas determinaciones.

La RS se determinó *in vitro* para cada muestra considerando los dos tamaños de tejidos vegetales o residuo vegetal del suelo y las tres profundidades del suelo, midiendo el flujo de CO₂ emitido por la actividad edáfica durante la incubación con el método dinámico de cámara cerrada (Parkinson, 1981). Para ello se

empleó un dispositivo portátil EGM-4, que utiliza una cámara SCR-1 y un analizador de gases infrarrojo no dispersivo (IRGA). Las mediciones se realizaron diariamente a temperatura ambiente durante 30 días, con un tiempo de medición de dos min por muestra, con un contenido de humedad del 50%, de 9:00 am a 12:00 pm. La humedad se mantuvo constante; para ello, después de cada evaluación, se calculó el volumen de agua perdido por diferencia de peso y se reestableció periódicamente con una micropipeta. La respiración del suelo se calculó de acuerdo con el flujo de CO₂ (tasa de cambio: flujo de CO₂ por unidad de área y tiempo), utilizando la fórmula siguiente:

$$R = b * \frac{P}{1000} * \frac{273}{273 + Ta} * \frac{40.01}{22.41} * \frac{V}{A}$$

Donde: R = flujo de CO₂ en g m⁻² h⁻¹; b = concentración de CO₂ en mg L⁻¹; V = volumen del sistema en m³; A= área en m²; P = presión atmosférica en mb; Ta = temperatura en °C.

2.5. Determinación de la macrofauna del suelo

La determinación de la macrofauna del suelo, se realizó a través del contenido de biomasa de organismos visibles en el suelo. Para ello en las parcelas de 25x25 m² se delimitaron cuadrantes de 1 x1 m², por triplicado, en las tres profundidades. En estos cuadrantes todos los organismos visibles del suelo se recogieron y luego se pesaron. La biomasa de la macrofauna del suelo (BMS) se expresó como peso (kg MS ha⁻¹), de acuerdo con la metodología propuesta por Anderson e Ingram (1993).

2.6. Determinación de la dinámica de carbono y nitrógeno

En las parcelas de 25 x 25 m² se seleccionaron tres puntos de muestreo en zig zag y se realizaron muestreos de suelo y evaluaciones dasométricas (diámetro y altura) en la biomasa vegetal, para determinar los contenidos de C y N.

Se realizaron calicatas en cada punto de muestreo, donde se determinó la densidad aparente (DA) en las tres profundidades, con el método del cilindro (Page *et al.*, 1982). Luego se determinó la materia orgánica del suelo de acuerdo con la metodología propuesta por Schulte & Hopkins (1996), que consiste en cuantificar la materia orgánica del suelo determinando la pérdida de peso por ignición.

El carbono orgánico del suelo y el contenido de nitrógeno total del suelo se midieron usando un analizador Shimadzu TOC-L. Posteriormente se calculó la relación C/N. Las conversiones de mg C o N g⁻¹ del suelo a Mg C o N ha⁻¹ se realizan utilizando la ecuación conocida (Gallardo, 2017): contenido de C o N (Mg ha⁻¹) = contenido relativo de C o N (mg g⁻¹ suelo) x DA (Mg m⁻³) x profundidad del suelo (m) x 10.

Para la biomasa vegetal se consideraron hojarasca, mantillo, árboles no frutales, árboles frutales (aguacate y café), y raíces.

La biomasa de los tejidos vegetales (hojarasca y mantillo) fue determinada en las muestras que se obtuvieron de un cuadrante de 1x1 m² en las parcelas de 25x25 m², por triplicado, de acuerdo con la metodología propuesta por Masuhara *et al.* (2015). A partir de aquí, como criterio general, la subcapa *L* se denominará hojarasca y la subcapa *F* se denominará mantillo, ambas correspondientes a la capa de O de material orgánico que recubre el suelo. La biomasa de las capas *L* y *F* se separaron y procesaron en el laboratorio, donde se realizaron determinaciones de C por combustión seca utilizando un analizador Shimadzu TOC-L y las de N por el método Kjeldahl (Nelson & Sommers, 1973). Previamente, se realizó la determinación de la biomasa de cada muestra a través de la materia seca expresada en Kg ha⁻¹.

Mientras que, para el peso de la materia seca en árboles frutales y no frutales se determinó mediante ecuaciones alométricas (Cuadro 1). Para ello se realizaron evaluaciones de tamaño de planta (diámetro y altura) para todos los árboles frutales y no frutales dentro de las parcelas de 25x25 m² antes mencionadas. Para obtener el valor de C en la biomasa, se multiplicó por el factor 0.5, con base en el supuesto de que el 50% de la materia seca de la especie es C (Gallardo, 2017).

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas usadas para determinar la biomasa de cada una de las especies de vegetación arbórea o arbustiva

Tipo de vegetación	Ecuación alométrica	Autor
Biomasa aérea de <i>Junglas</i> spp	$Y^{\#} = -0.834 + 2.223 \times {}^{\dagger}\log_{10} ({}^{\ddagger}\text{DBH})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de <i>Inga</i> spp	$Y = -0.889 + 2.317 \times \log_{10} ({}^{\#}\text{D})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de <i>Grevillea robusta</i>	$Y = -2.0082 + 2.3293 \times \ln(\text{DBH})$	Begazo & Jave (2018)
Biomasa aérea de plantas de café	$Y = -1.113 + 1.578 \times \log_{10} (\text{D}) + 0.581 \times \log_{10} ({}^{\#\#}\text{H})$	Segura <i>et al.</i> (2006)
Biomasa aérea de plantas de aguacate	$Y = \text{Log}(10^{(1.12 + 2.62 \times \log_{10} (\text{D}) + 0.03 \times \log_{10} ({}^{\#\#}\text{H}))})$	Marín <i>et al.</i> (2016)

$Y^{\#}$ = biomasa (kg), ${}^{\dagger}\log_{10}$ = logaritmo en base 10, ${}^{\ddagger}\text{DBH}$ = diámetro a la altura del pecho o a 1.30 m de altura, ${}^{\#}\text{D}$ = diámetro sobre los 15 cm, ${}^{\#\#}\text{H}$ = altura total de planta (m).

El C contenido en las raíces se calculó utilizando la ecuación de biomasa propuesta por Cairns *et al.* (1997), quienes consideraron la suma de la biomasa arbórea y arbustiva en materia seca (Mg MS ha⁻¹), como se muestra en la fórmula siguiente:

$$RB = \exp[-1.0587 + 0.8836 \times \ln(\text{BAA})]$$

Donde: RB = biomasa de raíces (Mg MS ha⁻¹), exp = exponente, ln = logaritmo natural, BAA = biomasa de árboles y arbustos en materia seca (Mg DM ha⁻¹).

Luego RB se multiplica por el factor 0.5 para calcular el contenido de carbono en las raíces, expresado en (Mg C ha⁻¹).

2.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para todas las variables (P <0.05), siendo los sistemas y profundidades las variables dependientes y el resto las independientes. Los sistemas y profundidades se compararon mediante la prueba HSD de Tukey para cada una de las variables analizadas. Para analizar

el impacto de la respiración del suelo en la dinámica de carbono y nitrógeno se utilizó la prueba de *Spearman* para el análisis de correlación y un análisis multivariado de componentes principales (ACP) para mostrar la estructura de dependencia entre la respiración del suelo y el resto de variables.

Los análisis se realizaron con el software estadístico InfoStat versión 2018-I y Stratigraphic Centurion XVI.

3. Resultados

3.1. Actividad biológica

3.1.1. Respiración en los residuos vegetales

En la capa *L*, el sistema agroforestal de café y aguacate presentó valores más bajos de residuos vegetales que los sistemas con renovación y podas severas, mientras que el monocultivo de aguacate presentó valores intermedios de residuos vegetales entre el sistema con plantas de aguacate introducidos y los otros dos cafetales (Cuadro 2). En los dos sistemas de café donde se encontró la capa *F*, los valores fueron similares. Se encontraron valores de respiración significativamente más altos en la capa *F* que en la capa *L*.

Cuadro 2. Respiración en la capa *L* y *F* (residuos orgánicos) y del suelo (kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹) en tres profundidades

Sistema	Capa <i>L</i>		Capa <i>F</i>		Suelo					
					0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm			
SCR	383±22	A	653±43	A	179±7.7	B	180±9.3	A	171±3.9	B
SCP	382±22	A	589±43	A	230±7.7	A	205±9.3	A	202±3.9	A
SCA	219±22	B	No existe	C	193±7.7	B	183±9.3	A	172±3.9	B
SMA	253±38	AB	No existe	C	212±7.7	AB	183±9.3	A	186±3.9	AB
<i>P</i> -valor	0.0045		0.0001		0.0081		0.2800		0.0016	
HSD	131.48		257.55		34.77		42.26		0.1769	

SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, *P*-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

3.1.2. Respiración en el suelo

El comportamiento de la respiración del suelo (Cuadro 2) en los sistemas evaluados tiende a ser mayor en la superficie del suelo (0-10 cm) con un promedio de 204 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹, disminuyendo significativamente a medida que aumenta la profundidad. Entre los sistemas se observó que a la profundidad de 0-10 cm el sistema con podas intensivas mostró la mayor respiración, seguido por el monocultivo de aguacate, mientras que los sistemas con introducción de aguacate y el renovado, registraron una respiración menos intensa. A 10-20 cm de profundidad el promedio fue de 188 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹, sin que se detectaran diferencias significativas entre sistemas; a 20-30 cm de profundidad el promedio fue de 183 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹ y el comportamiento fue similar al de 0-10 cm de profundidad. La respiración acumulada de las tres profundidades permite generar el siguiente orden de actividad del suelo entre los sistemas: SCP > CMA > SCR = SCA.

3.1.3. Macrofauna del suelo

La macrofauna del suelo está concentrada en superficie del suelo, es decir en la profundidad de 0-10 cm. Esta macrofauna mostró un rango oscilante entre 71.5 y 100% (Cuadro 3); y disminuye conforme aumenta la profundidad del suelo. En los sistemas sin capa *F* (sistema con plantas de aguacate introducidas y el monocultivo de aguacate) no se presentó macrofauna en las profundidades de 10-20 y 20-30 cm. La biomasa total de la macrofauna del suelo fue mayor en el sistema con podas severas (SCP), seguido del SCR (sistema con alta densidad de siembra), mientras que los sistemas asociados a aguacate (SCA y SMA), presentaron los valores significativamente más bajos.

Cuadro 3. Biomasa de la macrofauna del suelo (Mg DM ha⁻¹) por tipo de sistema

Tipo de sistema	BMS 0-10 cm		BMS 10-20 cm		BMS 20-30 cm		Total Mg DM ha ⁻¹
	Mg DM ha ⁻¹	%	Mg DM ha ⁻¹	%	Mg DM ha ⁻¹	%	
SCR	0.88±0.07 ^B	71.5	0.30±0.01 ^A	24.4	0.044±0.004 ^A	3.2	1.23±0.07 ^B
SCP	1.46±0.07 ^A	90.1	0.14±0.01 ^A	8.6	0.017±0.004 ^B	1.03	1.62±0.07 ^A
SCA	0.02±0.11 ^C	100.0	No existe		No existe		0.02±0.12 ^C
SMA	0.01±0.11 ^C	100.0	No existe		No existe		0.01±0.12 ^C
<i>P</i> -valor	0.0001		0.0001		0.0001		0.0001
HSD	0.364		0.0714		0.0222		0.3919

BMS: biomasa de macrofauna del suelo; SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, *P*-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

3.2. Dinámica de carbono y nitrógeno

3.2.1. Carbono orgánico y nitrógeno total en el suelo

Los valores del contenido de carbono orgánico del suelo almacenado en los suelos del sistema agroforestal de café con plantas de aguacate introducidas superaron significativamente a los demás sistemas de café y al monocultivo de aguacate (Cuadro 4); esta tendencia se observa en las tres profundidades. De manera similar, el contenido de nitrógeno total del suelo en el sistema de café con plantas de aguacate introducidas superó significativamente los valores de los otros sistemas en las tres profundidades (casi duplicándolos).

Cuadro 4. Carbono orgánico del suelo (Mg C ha⁻¹) y nitrógeno total del suelo (Mg N ha⁻¹), en tres profundidades.

Sistema	COS	Suelo			NTS	Suelo		
		0-10 cm	0-20 cm	0-30 cm		0-10 cm	0-20 cm	0-30 cm
SCR	60±3.9 ^B	28±2.0 ^B	17±1.5 ^B	15±1.6 ^B	4.9 ±0.37 ^C	2.0±0.15 ^B	1.8±0.18 ^B	1.1±0.13 ^C
SCP	71±3.9 ^B	29±2.0 ^B	25±1.5 ^B	17±1.6 ^B	5.6 ±0.37 ^{BC}	2.3±0.15 ^B	2.1±0.18 ^B	1.3±0.13 ^{BC}
SCA	139±6.1 ^A	51±3.4 ^A	47±2.6 ^A	41±2.8 ^A	11.7±0.65 ^A	4.4±0.26 ^A	4.0±0.32 ^A	3.3±0.22 ^A
SMA	74±6.8 ^B	32±3.4 ^B	24±2.6 ^B	18±2.8 ^B	7.2 ±0.65 ^B	2.7±0.26 ^B	2.5±0.32 ^B	2.0±0.22 ^B
<i>P</i> -valor	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
HSD	22.020	10.9649	8.5201	9.0768	2.0950	0.8249	1.0208	0.7187

COS: carbono orgánico del suelo; NTS: nitrógeno total del suelo; SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, *P*-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

3.2.2. Contenido de carbono y nitrógeno en la biomasa vegetal

Se observó una fuerte mineralización de los residuos orgánicos en todos los sistemas evaluados, ya que la capa *L* tiene valores muy bajos, entre 0.18 y 0.37

Mg C ha⁻¹, (Cuadro 5). Los contenidos de N en las capas de hojarasca (*L*) y mantillo (*F*) mostraron el mismo comportamiento que en los contenidos de C. Los valores de N de la capa *L* no mostraron diferencia estadística significativa, mientras que en la capa *F* el sistema con podas severas mostró el valor más alto, seguido por el sistema renovado. En los sistemas asociados al aguacate (SCA y SMA) no existe capa *F*.

Cuadro 5. Carbono (Mg C ha⁻¹) y Nitrógeno (Mg N ha⁻¹) en hojarasca (capa *L*), mantillo (capa *F*)

Sistema	Carbono		Nitrógeno	
	Capa <i>L</i>	Capa <i>F</i>	Capa <i>L</i>	Capa <i>F</i>
SCR	0.19±0.06 ^A	0.57±0.09 ^B	0.007±0.003 ^A	0.026±0.004 ^B
SCP	0.37±0.06 ^A	1.12±0.09 ^A	0.014±0.01 ^A	0.047±0.004 ^A
SCA	0.26±0.11 ^A	No existe ^C	0.010±0.01 ^A	No existe ^C
SMA	0.18±0.11 ^A	No existe ^C	0.007±0.003 ^A	No existe ^C
<i>P</i> -valor	0.2466	0.0001	0.3762	0.0016
HSD	0.36378	0.46832	0.0117	0.8249

SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, *P*-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

El contenido de carbono en árboles fue significativamente mayor en el monocultivo de aguacate (31 Mg C ha⁻¹) que en los árboles de los otros sistemas. El contenido de C en la biomasa radicular está relacionado con la poda, ya que el sistema con poda severa fue el que mostró significativamente el menor valor entre los sistemas evaluados (Cuadro 6) y generó mayor contenido de C por las plantas herbáceas, mientras que el sistema con plantas de aguacate introducidos se asemeja a los cafetales manejados con poda normal y al huerto de aguacate convencional, valores que oscilan entre 0,7 y 1,7 Mg C ha⁻¹.

Cuadro 6. Carbono en la biomasa de las plantas de los sistemas (Mg C ha⁻¹)

Sistema	Árboles	Arbustos	Raíces	Total (CBV)	Plantas herbáceas (Mg C ha ⁻¹ a ⁻¹)
SCR	0.8±1.6 ^C	32 ±1.7 ^A	6.7±0.4 ^A	40±2.6 ^A	0.7±0.11
SCP	2.3±1.6 ^C	11±1.7 ^C	3.1±0.4 ^B	16±2.6 ^B	1.7±0.11
SCA	11±1.6 ^B	19±1.7 ^B	5.4±0.4 ^A	36±2.6 ^A	0.9±0.20
SMA	31±1.6 ^A	No existe ^D	6.1±0.4 ^A	37±2,6 ^A	1.0±0.20
<i>P</i> -valor	0.0001	0.0001	0.0001	0.0007	0.0001
HSD	7.41	7.67	1.90	11.68	0.63290

SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; CBV: Carbono en biomasa vegetal; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, *P*-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

En cuanto al contenido total de carbono en biomasa vegetal, los sistemas asociados al aguacate generan valores semejantes a el sistema con renovación y superan en un 55% los valores del sistema con podas severas. El alto contenido de carbono en la biomasa vegetal del sistema con renovación se debe al componente arbustivo (4 000 cafetales ha⁻¹); por esta razón, el sistema tiene una mayor cantidad de C almacenado en arbustos que los otros sistemas de café, lo que confirma que el valor de C en la biomasa vegetal depende en gran medida de la densidad de siembra. Sin embargo, el sistema con podas severas, que tiene una mayor densidad de siembra (con 2 400 cafetales ha⁻¹ sometidos a poda severa) que el sistema agroforestal con plantas de aguacate introducidas (1 800

cafetales ha⁻¹), también tuvo un valor de C menor; por lo que el contenido de C en biomasa vegetal también depende de la intensidad de la poda. Como resultado, el orden de C acumulado en estos cuatro sistemas es: SCR > SMA = SCA > SCP.

3.2.3. Relación C/N

Las relaciones C/N de la Capa L no mostraron diferencias entre los sistemas, oscilando entre 22 y 27 (Cuadro 7); estos valores fueron significativamente más altos que en la capa F. Los sistemas con podas severas y el sistema renovado, reportaron mayor relación C/N en la capa F que los sistemas asociados a aguacate; estos valores fueron inferiores en la capa L. En los SCA y SMA no se registró capa F.

En los sistemas estudiados las relaciones C/N del suelo variaron de 11 a 14 sin diferencias estadísticas significativas entre los sistemas; lo mismo se observó en las tres profundidades del suelo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Relación Carbono/Nitrógeno en hojarasca (capa L), mantillo (capa F) y suelo en las tres profundidades

Sistema	C/N Capa L	C/N Capa F	C/N 0-10 cm	C/N 10-20 cm	C/N 20-30 cm	C/N (COS/NTS)
SCR	27±1.5 ^A	21.0±0.84 ^B	14±1.2 ^A	9±1.2 ^A	15±2.0 ^A	12±1.1 ^A
SCP	27±1.5 ^A	23.8 ±0.84 ^A	14±1.2 ^A	13±1.2 ^A	15±2.0 ^A	14±1.1 ^A
SCA	25±2.6 ^A	No existe ^C	12±2.1 ^A	12±2.1 ^A	13±3.4 ^A	12±2.0 ^A
SMA	22±2.6 ^A	No existe ^C	13±2.1 ^A	10±2.1 ^A	10±3.4 ^A	11±2.0 ^A
P-valor	0.5192	0.0287	0.7511	0.1524	0.5639	0.6268
HSD	10.548	2.518	6.819	6.773	11.113	6.346

SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; C/N: relación carbono – nitrógeno; letras diferentes indican diferencia estadística significativa, P-valor ≤0.05, HSD: Diferencia significativa mínima.

4. Discusión

4.1. La actividad biológica del suelo

El diseño topológico de los sistemas agroforestales de café renovado y con podas severas modifican la composición florística del sistema y la cantidad de residuos orgánicos, lo que puede generar variaciones en la respiración del suelo; debido a que la diversidad de cobertura en un sistema aumenta la actividad microbiana (Strickland, Thomason, Avera *et al.*, 2019) y genera variaciones en el carbono orgánico del suelo. Por otro lado, la respiración del suelo en sistemas agroforestales manejados con alta diversidad y densidad de siembra puede aumentar 150% la respiración del suelo que en cafetales manejados como monocultivo (Souza *et al.*, 2012).

La baja respiración del suelo encontrada en el sistema agroforestal con plantas de aguacate introducidas podría atribuirse a la naturaleza de la hojarasca producida por la introducción del aguacate en el cafetal, ya que la relación C/N de la capa L tiende a ser menor que la de los demás sistemas. Los estudios con hojarasca de plantas de café informaron que contienen alrededor de 44% de

lignina (Munguía, Beer y Harmand, 2004), mientras que la hojarasca de aguacate contiene solo 34% de lignina (Medina, Salazar, Bonilla *et al.*, 2017); esto significa que, con la introducción del aguacate, la hojarasca inicialmente producida es más vulnerable al ataque de microorganismos y luego se estabiliza formando sustancias húmicas que ralentizan la mineralización (Gallardo, 2017) en el suelo. Estas interacciones reflejan que la respiración del suelo disminuye cuando no hay diversificación en los componentes arbóreos y arbustivos de los sistemas (Xi *et al.*, 2012); sin embargo, los valores de respiración total en el sistema agroforestal de café con plantas de aguacate introducidas ($767 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$; incluye hojarasca, mantillo y suelo) superan los valores reportados por Hergoualc'h, *et al.* (2008) para la respiración total encontrada en el sistema agroforestal de café establecido en suelos andosoles ($540 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

Los valores de macrofauna del suelo en los sistemas agroforestales renovados y con podas severas contrastan con los sistemas asociados con aguacates, y se presenta con un mayor valor en la profundidad de 0-10 cm de todos los sistemas. En los sistemas asociados con aguacates no se reportó macrofauna del suelo en las profundidades de 10-20 y 20-30 cm. Esta distribución permite evidenciar la dependencia de las capas *L* y *F* para la actividad de la macrofauna del suelo, puesto que en el sistema de café con plantas de aguacate introducidas y el monocultivo de aguacate, sólo existe la primera capa (residuos orgánicos generados por las plantas de aguacate). Este comportamiento coincide con Pardo, Vélez, Sevilla, *et al.* (2006) quienes indicaron que la biomasa de la macrofauna del suelo se desarrolla de acuerdo a los centímetros existentes de residuos orgánicos.

Del mismo modo, el contenido total de macrofauna del suelo en los sistemas de café con renovación y limpieza severa superaron el promedio de $500 \text{ kg MS ha}^{-1}$ reportado por Brown, Frago, Barois, *et al.* (2001), lo que puede atribuirse a la diversificación de árboles de sombra y de variedades de café manejadas. Mientras que en los sistemas con plantas de aguacate introducidos y el monocultivo de aguacate la baja biomasa de macrofauna del suelo se atribuye al manejo intensivo y se asemejan al promedio de $0.1 \text{ Mg MS ha}^{-1}$ reportado por Brown *et al.* (2001). Por tanto, se corrobora que la introducción de aguacates genera cambios en la producción de residuos orgánicos y en las condiciones de humedad y temperatura, que influyen en la actividad de la macrofauna, siendo ésta sensible a la variación de condiciones edafoclimáticas que generan los cultivos de manejo intensivo (Paolini, 2018).

4.2. Dinámica del nitrógeno y calidad de la materia orgánica del suelo

Los contenidos de NTS en el sistema con plantas de aguacate introducidas se asemejan a los valores promedios de cafetales tradicionales ($14.2 \text{ Mg N ha}^{-1}$; Cristóbal *et al.*, 2019), mientras que los encontrados en el monocultivo de aguacate a los sistemas de café comercial (7.9 Mg N ha^{-1} ; Cristóbal *et al.*, 2019);

y los valores de los demás sistemas fueron significativamente inferiores. Por tanto, el contenido de N de los residuos orgánicos generados por la introducción de aguacate parece marcar las diferencias entre estos sistemas estudiados.

Las variaciones de NTS se pueden atribuir a la relación positiva de los residuos orgánicos con la respiración microbiana, puesto que, según Bardgett y van der Putten (2014), afectan a los procesos biogeoquímicos y, por tanto, a la dinámica del N; a su vez, ésta se relaciona con la calidad de MOS; de ahí la utilización de la relación C/N como índice. La relación C/N del suelo varió entre 11 y 14 en todos los SAF estudiados; este rango se asemeja al de 11 a 15 reportado por Payán, Jones, Harmand, *et al.* (2002). Valores menores a 11 corresponden a una rápida ruptura de tejidos y posterior mineralización, ya que la presencia de N estimula la actividad microbiana (Gamarra, Díaz, Vera, *et al.*, 2018), aprovechándose la liberación de nutrientes generado por las plantas.

4.3. El impacto de la actividad biológica del suelo en la dinámica de carbono y nitrógeno de los sistemas

La prueba de *Spearman* ($p \leq 0.05$) muestra que existe correlación entre la respiración del suelo y las variables evaluadas por profundidad, lo que permite analizar la estructura de dependencia por sistema (Cuadro 8).

Cuadro 8a. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidad) y las variables evaluadas (continúa)

Sistema	Prof.		BMS ₁₀	BMS ₂₀	BMS ₃₀	BMS	MOS ₁₀	MOS ₂₀	MOS ₃₀
SCR	0-10 cm	Coef,-C	-0.50	1.00	-0.87	-0.50	1.00	1.00	-0.50
		P-value	0.48	*	0.22	0.48	*	*	0.48
	10-20 cm	Coef,-C	0.50	-1.00	0.87	0.50	-1.00	-1.00	0.50
		P-value	0.48	*	0.22	0.48	*	*	0.48
	20-30 cm	Coef,-C	0.50	-1.00	0.87	0.50	-1.00	-1.00	0.50
		P-value	0.48	*	0.22	0.48	*	*	0.48
SCP	0-10 cm	Coef,-C	-1.00	-0.50	-0.87	-1.00	1.00	1.00	1.00
		P-value	*	0.48	0.22	*	*	*	*
	10-20 cm	Coef,-C	0.50	1.00	0.00	0.50	-0.50	-0.50	-0.50
		P-value	0.48	*	1.00	0.48	0.48	0.48	0.48
	20-30 cm	Coef,-C	0.50	-0.50	0.87	0.50	-0.50	-0.50	-0.50
		P-value	0.48	0.48	0.22	0.48	0.48	0.48	0.48
SCA	0-10 cm	Coef,-C	-0.87	-	-	-0.87	0.50	-1.00	-0.50
		P-value	0.22	-	-	0.22	0.48	*	0.48
	10-20 cm	Coef,-C	-0.87	-	-	-0.87	-0.50	-0.50	-1.00
		P-value	0.22	-	-	0.22	0.48	0.48	*
	20-30 cm	Coef,-C	-0.87	-	-	-0.87	0.50	-1.00	-0.50
		P-value	0.22	-	-	0.22	0.48	*	0.48
SMA	0-10 cm	Coef,-C	0.00	-	-	0.00	-1.00	-1.00	-0.50
		P-value	1.00	-	-	1.00	*	*	0.48
	10-20 cm	Coef,-C	0.00	-	-	0.00	1.00	1.00	0.50
		P-value	1.00	-	-	1.00	*	*	0.48
	20-30 cm	Coef,-C	-0.87	-	-	-0.87	-0.50	-0.50	-1.00
		P-value	0.22	-	-	0.22	0.48	0.48	*

BMS: Macrofauna total del suelo; MOS: Materia orgánica del suelo; CArb: C en árboles; Ccafé: C en cafetos; CBr: C en raíces; CBv: C en biomasa vegetal; CHe: C producido por herbáceas; C-CL: C en la capa L o en hojarasca; C-CF: N en la capa F o en mantillo; COS: C orgánico del suelo (acumulado en la profundidad de 0-30 cm); N-CL: N en la capa L o en hojarasca; N-CF: N en la capa F o en mantillo; NTS: N total de suelo; C/N: Relación carbono/nitrógeno del suelo; SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; Coef-C: Coeficiente de correlación *Spearman*; *Significancia $p \leq 0,05$.

El análisis de correlación indica que la abundancia de materia orgánica del suelo se debe a la baja emisión de CO₂ generada especialmente en el sistema con renovación; este comportamiento coincide con Gallardo (2017) quien indicó la existencia de una relación inversa entre la respiración del suelo y la cantidad de materia orgánica del suelo, ya que una alta relación C/N indica pobre humificación en los sistemas, lo que repercute en las propiedades del suelo y la fertilidad; sin embargo, la alta densidad de siembra (4 000 plantas de café ha⁻¹) influye en los residuos del suelo, lo que a su vez afecta reservas de carbono orgánico y en el propio ecosistema (Lozano, Parras and Brevik, 2016). Esta alta densidad de plantación da como resultado una relación directa con el carbono de la biomasa arbórea, lo que indica que la extensión de la cobertura arbórea puede afectar la insolación directa del suelo, bajando la temperatura y, por lo tanto, restringiendo la respiración del suelo (Aceñolaza & Gallardo, 1995). Por otro lado, la respiración del suelo puede ser regulada por la variación de temperatura, que influye en el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total del suelo (Gómez *et al.*, 2016).

La respiración del suelo en el sistema con podas severas puede atribuirse al aporte de residuos orgánicos por poda severa, lo que se refleja en la relación inversa de la respiración del suelo con la biomasa de la macrofauna edáfica, carbono de la biomasa arbórea y carbono en la capa L, lo que muestra que la densidad arbórea y el tipo de cobertura son los factores responsables de generar las condiciones adecuadas para la actividad de los organismos en el suelo, que a su vez dependen del triturado previo realizado por la macrofauna del suelo, y además, es sensible a variaciones de humedad y temperatura, y cambios de uso del suelo y manejo agronómico (Paolini, 2018). Cabe señalar que la mayor luminosidad debajo de la copa produce más plantas herbáceas.

En el sistema con plantas de aguacate introducidas, la respiración del suelo está influenciada por el C en la biomasa vegetal (presencia de aguacates) y C/N_{CapaL} (calidad de residuos orgánicos), lo que indica que la actividad del suelo en este sistema está ligada al aporte de residuos orgánicos de los aguacates, ya que uno de los factores que regulan la respiración del suelo es la calidad de los residuos vegetales (Scholze, Knorr and Heimann, 2003). Es de destacar que la respiración del suelo en este caso está influenciada negativamente por la cantidad de MOS₂₀, C_{capaL}, N_{capaL}, C/N₃₀ y C/ N, demostrando que la calidad de residuos orgánicos influye en la calidad de MOS, ya que favorece la actividad de los microorganismos que influyen en el proceso de humificación, que a su vez depende de la calidad del C disponible (Acosta y Paolini, 2006); para este tipo de sistema el alto contenido de MOS y COS se puede atribuir a la incorporación de vermicomposta enriquecida, es decir material ya procesado o bioestable, que permite comprender la relación inversa entre la respiración del suelo y los contenidos de carbono y nitrógeno.

En el monocultivo de aguacate, la intensidad de la respiración del suelo puede estar condicionada por los contenidos de N_{capaL}, y N₁₀, lo que indica que la

presencia de N genera mineralización de residuos orgánicos y la respiración del suelo está relacionada con la mineralización de residuos orgánicos (Zhou *et al.*, 2018), lo que influye en la mineralización de N; sin embargo, C₁₀, C₂₀, C₃₀, MOS₁₀ y MOS₂₀ tienen un impacto negativo en la respiración del suelo. Esta tendencia indica que existe una fuerte humificación, es decir, una mayor bioestabilidad de la materia orgánica del suelo, lo que genera una menor respiración del suelo, ya que hay residuos orgánicos de menor descomposición (Gallardo, 2017). En las otras profundidades, no se diferencia un patrón de dependencia entre variables.

Cuadro 8 b. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidades) y las variables evaluadas (continúa).

Sistema	Prof.		CBa	Ccafé	CBr	CBv	CHe	C-CL	C-CF	C ₁₀	C ₂₀	C ₃₀	COS	N-CL	N-CF	
SCR	0-10 cm	Coef,-C	-1,00	1,00	0,87	0,50	-0,86	1,00	1,00	0,50	0,50	-0,50	0,50	1,00	1,00	
		P-valor	*	*	0,22	0,48	0,34	*	*	0,48	0,48	0,48	0,48	*	*	
	10-20 cm	Coef,-C	1,00	-1,00	-0,87	-0,50	0,92	-1,00	-1,00	-0,50	-	0,50	0,50	-0,50	-1,00	-1,00
		P-valor	*	*	0,22	0,48	0,26	*	*	0,48	0,48	0,48	0,48	*	*	
	20-30 cm	Coef,-C	1,00	-1,00	-0,87	-0,50	0,99	-1,00	-1,00	-0,50	-	0,50	0,50	-0,50	-1,00	-1,00
		P-valor	*	*	0,22	0,48	0,07	*	*	0,48	0,48	0,48	0,48	*	*	
SCP	0-10 cm	Coef,-C	-1,00	0,50	0,50	0,50	-0,50	-1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	-0,50	1,00	
		P-valor	*	0,48	0,48	0,48	0,48	*	*	0,48	*	0,48	0,48	0,48	*	
	10-20 cm	Coef,-C	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	0,50	-0,50	-1,00	-	0,50	-1,00	-1,00	-0,50	-0,50
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48	*	0,48	*	*	0,48	0,48	
	20-30 cm	Coef,-C	0,50	-1,00	-1,00	-1,00	-0,50	0,50	-0,50	0,50	-	0,50	0,50	0,50	1,00	-0,50
		P-valor	0,48	*	*	*	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48
SCA	0-10 cm	Coef,-C	-0,50	0,50	0,50	1,00	-1,00	-1,00	-	1,00	0,50	-0,50	0,50	-1,00	-	
		P-valor	0,48	0,48	0,48	*	*	*	-	*	0,48	0,48	0,48	*	-	
	10-20 cm	Coef,-C	-1,00	-0,50	1,00	0,50	-0,50	-0,50	-	0,50	1,00	0,50	1,00	-0,50	-	
		P-valor	*	0,48	*	0,48	0,48	0,48	-	0,48	*	0,48	*	0,48	-	
	20-30 cm	Coef,-C	-0,50	0,50	0,50	1,00	-1,00	-1,00	-	1,00	0,50	-0,50	0,50	-1,00	-	
		P-valor	0,48	0,48	0,48	*	*	*	-	*	0,48	0,48	0,48	*	-	
SMA	0-10 cm	Coef,-C	0,50	-	0,50	0,50	0,50	0,50	-	-0,50	-	1,00	-1,00	-1,00	1,00	-
		P-valor	0,48	-	0,48	0,48	0,48	0,48	-	0,48	*	*	*	*	*	-
	10-20 cm	Coef,-C	-0,50	-	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-	0,50	1,00	1,00	1,00	-1,00	-	
		P-valor	0,48	-	0,48	0,48	0,48	0,48	-	0,48	*	*	*	*	-	
	20-30 cm	Coef,-C	-0,50	-	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-	-1,00	-	0,50	-0,50	-0,50	0,50	-
		P-valor	0,48	-	0,48	0,48	0,48	0,48	-	*	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	-

BMS: Macrofauna total del suelo; MOS: Materia orgánica del suelo; CArb: C en árboles; Ccafé: C en cafetos; CBr: C en raíces; CBv: C en biomasa vegetal; CHe: C producido por herbáceas; C-CL: C en la capa L o en hojarasca; C-CF: N en la capa F o en mantillo; COS: C orgánico del suelo (acumulado en la profundidad de 0-30 cm); N-CL: N en la capa L o en hojarasca; N-CF: N en la capa F o en mantillo; NTS: N total de suelo; C/N: Relación carbono/nitrógeno del suelo; SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; Coef-C: Coeficiente de correlación Spearman; *Significancia $p \leq 0,05$.

Cuadro 8 c. Correlación entre la respiración del suelo (por profundidades) y las variables evaluadas (concluye)

Sistema	Prof.		N ₁₀	N ₂₀	N ₃₀	NTS	C-CL /N-CL	C-CF /N- CF	C ₁₀ /N ₁₀	C ₂₀ /N ₂₀	C ₃₀ /N ₃₀	C/N
SCR	0-10 cm	Coef,-C	0,50	-0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	-0,50	0,50	-0,50	-0,50
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48	0,48	0,48
	10-20 cm	Coef,-C	-0,50	0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-1,00	0,50	-0,50	0,50	0,50
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48	0,48	0,48
	20-30 cm	Coef,-C	-0,50	0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-1,00	0,50	-0,50	0,50	0,50
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48	0,48	0,48
SCP	0-10 cm	Coef,-C	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	*	*	0,48	*	*
	10-20 cm	Coef,-C	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	1,00	-0,50	-0,50	0,50	-0,50	-0,50
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
	20-30 cm	Coef,-C	1,00	1,00	1,00	1,00	-0,50	-0,50	-0,50	-1,00	-0,50	-0,50
		P-valor	*	*	*	*	0,48	0,48	0,48	*	0,48	0,48
SCA	0-10 cm	Coef,-C	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	-	0,50	-0,50	-1,00	-1,00
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	*	-	0,48	0,48	*	*
	10-20 cm	Coef,-C	-0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	-	1,00	-1,00	-0,50	-0,50
		P-valor	0,48	*	*	*	0,48	-	*	*	0,48	0,48
	20-30 cm	Coef,-C	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	-	0,50	-0,50	-1,00	-1,00
		P-valor	0,48	0,48	0,48	0,48	*	-	0,48	0,48	*	*
SMA	0-10 cm	Coef,-C	1,00	0,50	-0,50	0,50	0,50	-	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
		P-valor	*	0,48	0,48	0,48	0,48	-	0,48	0,48	0,48	0,48
	10-20 cm	Coef,-C	-1,00	-0,50	0,50	-0,50	-0,50	-	0,50	0,50	0,50	0,50
		P-valor	*	0,48	0,48	0,48	0,48	-	0,48	0,48	0,48	0,48
	20-30 cm	Coef,-C	0,50	1,00	0,50	1,00	-0,50	-	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
		P-valor	0,48	*	0,48	*	0,48	-	*	*	*	*

MBe: Macrofauna total del suelo (biomasa de organismos acumulada en la profundidad de 0-30 cm); MOS: Materia orgánica del suelo; CArb: C en árboles; Ccafé: C en cafetos; CBr: C en raíces; CBv: C en biomasa vegetal; CHe: C producido por herbáceas; C-CL: C en la capa L o en hojarasca; C-CF: Nen la capa F o en mantillo; COS: C orgánico del suelo (acumulado en la profundidad de 0-30 cm); N-CL: N en la capa L o en hojarasca; N-CF: Nen la capa F o en mantillo; NTS: N total de suelo; C/N: Relación carbono/nitrógeno del suelo; ; SCR: sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SCA: sistema agroforestal de café con aguacate; SMA: Sistema de monocultivo de aguacate; Coef-C: Coeficiente de correlación Spearman; *Significancia $p \leq 0,05$.

El análisis de componentes principales (Figura 1) indica que la variación en la dinámica de C y N en los cuatro sistemas estudiados se explica en un 67,7% por la relación positiva entre la variable respiración, C_{café} (C en cafetales), CHe (C en plantas herbáceas), C_{CapaL}, C_{CapaF}, N_{CapaL}, N_{CapaF}, todas las relaciones C / N y biomasa de la macrofauna edáfica en las tres profundidades y la variación negativa en las variables COS, TNS, C, N y MOS en las tres profundidades. Este valor porcentual acumulado en los componentes 1 y 2 confirma que la cantidad y tipo de residuos orgánicos influye en las emisiones de CO₂, generando mayores contenidos de C y N en las capas F y L, así como una mayor relación C/N en la

que en todos los sistemas se aporta materia orgánica en forma de composta o vermicomposta.

El componente 1 del diagrama de dispersión del análisis de componentes principales muestra que existen dos grupos de variables: 1) aquellas relacionadas con el aporte de residuos orgánicos que tienen una relación positiva con la respiración del suelo y la macrofauna del suelo; y 2) los que generan eutrofia y una relación inversa con la respiración del suelo. Por otro lado, el componente 2 discrimina las variables del suelo, del C en la biomasa vegetal, el carbono de la biomasa arbórea y el C en las plantas de café como opuesto a las variables relacionadas con la materia orgánica del suelo y la respiración del suelo; sin embargo, la macrofauna total del suelo y las relaciones C / N no se discriminan ya que está en ambos lados de los ejes.

5. Conclusión

Las variables que permiten explicar la variación de la respiración del suelo están en relación con el N aportado al suelo, por lo que un cambio de la composición florística de un cafetal genera variaciones en el funcionamiento del sistema. Como consecuencia, la respiración del suelo es más intensa en los sistemas de café renovados y con limpieza severa y se atenúa en cuanto se introduce el aguacate.

La macrofauna del suelo depende fuertemente de la existencia de hojarasca permanente; la desaparición de la subcapa *F* al introducir el aguacate origina un empobrecimiento de la macrofauna del suelo, por lo que el sistema con aguacate introducido se comporta como un sistema con manejo intensivo.

El análisis de componentes principales indica que casi la mitad de la variación de la dinámica de C y N depende directamente de la relación positiva entre la respiración del suelo, C y N existente como residuos orgánicos (Capa *L* y Capa *F*) y negativa con las variables relacionadas con C y N del suelo.

6. Literatura citada

- Aceñolaza, P. and Gallardo, J.F. (1995). Influencia de la edad del bosque en la evolución de la pérdida de peso seco en hojarasca de *Alnus acuminata* en alisedas de la provincia de Tucumán (Argentina). *For. Syst.*, 4(2), pp 177-188.
- Acosta, Y. and Paolini, J. (2006). Dinámica de la biomasa microbiana (C y N) en un suelo de la península de Paraguaná tratado con residuos orgánicos. *Multiciencias*. 6(2), pp 180 – 187.
- Anderson, J.M. and Ingram, J.S.I. (1993). Tropical Soil biology and fertility; A handbook of methods, 2nd ed. CAB International Wallingford. 221 p.
- Bardgett, R.D. and van der Putten, W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 7528(515), pp 505-511. doi: 10.1038/nature13855.

- Begazo, K. and Jave, J. (2018). Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en especies arbóreas de Lima, Perú. *Rev. For. Perú.* 33(1), pp 76 -90.
- Brown, G.G., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P., Patrón, J.C., Bueno, J., Moreno, G., Lavelle, P., Ordaz, V. and Rodríguez, C. (2001). Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana.* 84, pp 79-110. doi: <https://doi.org/10.21829/azm.2001.8401847>.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthés, B.G., Saby, N.P.A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M. and Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms, and spatial distribution of soil organic carbon: A case study in a Mediterranean context. *Geoderma.* 259-260, pp 288-299. doi: [10.1016/j.geoderma.2015.06.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015).
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H. and Baumgardner, G.A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecol.* 111(1), pp 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s004420050201>.
- Cristóbal, D., Tinoco, J.A., Prado, J.V. and Hernández, E. (2019). Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry, and coffee monoculture systems. *Rev. Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 25(2), pp 169-184. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.070>.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2016). Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. Café 2016. Documento técnico de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. México, 37p.
- Franco, M., Leos, J., Salas, J., Acosta, M., García, A. (2018). Análisis de costos y competitividad e la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 9 (2), pp 391-403.
- Gallardo, J.F. (2017). La materia orgánica del suelo; residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 424 p.
- Gamarra, C.C., Díaz, M.I., Vera, M.P.M. and Nicolás, A.J. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Rev. Mexicana de Ciencias Forestales.* 9(46), pp 4-26. doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>.
- Giardina, C.P., Binkley, D., Ryan, M.G., Fownes, J.H. and Senock, R.S. (2004). Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia.* 139, pp 545–550.
- Gómez, L., Cardoso, I.M., Mendonca, E., Fernandes, R.B., Lopes, V. and Oliveira, T. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agric. & For. Meteorol.* 224, pp 30-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>.

- Hedo, J., Lucas-Borja, M. E., Wic, C., Andrés-Abellán, M. and de Las Heras, J. (2015). Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands. *Solid Earth*. 6(1), pp 243-252. doi: <https://doi.org/10.5194/se-6-243-2015>.
- Hergoualc'h, K., Skiba, U., Harmand, J.M. and Hénault, C. (2008). Fluxes of greenhouse gases from Andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochem*. 89, pp 329–345.
- Iqbal, J., Hu, R., Feng, M., Lin, S., Malghani, S. and Ali, I. M. (2010). Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at Three Gorges Reservoir Area, South China. *Agric., Ecosyst. & Environ.* 137(3-4), pp 294-307. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.015>.
- Lozano, B., Parras, L. and Brevik, E.C. (2016). Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Sci. Total Environ.* 544, pp 963-970. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.022>.
- Lu, D., Cheng, R., Shi, Z. and Wang, W. (2017). Decomposition of Leaves and Fine Roots in Three Subtropical Plantations in China Affected by Litter Substrate Quality and Soil Microbial Community. *Forests*. 11 (8), pp 412-420. doi: 10.3390/f8110412.
- Marín, Q., Andradæ, H.J. and Sandoval, A.P. (2016). Fijación de carbono en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *U.D.C.S Actualidad & Divulgación Científica*. 19 (2), pp 352 – 360.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J.C., Salcedo, E.S., Juárez, M.J. and Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Amazónica Ciencia y Tecnología*. 4(1), pp 66-93.
- Medina, R., Salazar, S., Bonilla, J., Herrera, J., Ibarra, M. and Álvarez, A. (2017). Secondary Metabolites and Lignin in 'Hass' Avocado Fruit Skin during Fruit Development in Three Producing Regions. *HortScience Horts*. 52(6), pp 852-858. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11882-17>.
- Montiel, G., Krishnamurthy, L., Vásquez, A., Uribe, M. (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana*. 26 (1), pp. 85 - 90.
- Munguía, R., Beer, J., Harmand, J.M. and Hagggar, J. (2004). Tasa de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupa*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas. *Agroforestería en las Américas*. 41 (42), pp 62-68.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. (1973). Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal*. 65, pp 109 – 112.

- Okur, N., Kayikcioglu, H.H., Ates, F. and Yagmur, B. (2015). A comparison of soil quality and yield parameters under organic and conventional vineyard systems in Mediterranean conditions (West Turkey). *Biol. Agric. Hortic.* 32, pp 1-12. doi: 10.1080/01448765.2015.1033645.
- Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical Properties Second Editions* Madison, Wisconsin, USA. 1159 p.
- Paolini, J.E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana.* 36(1), pp 13-22. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>.
- Pardo, L. C., Vélez, C.P., Sevilla, F. and Madrid, O. (2006). Abundancia y biomasa de macroinvertebrados edáficos en la temporada lluviosa, en tres usos de la tierra, en los Andes colombianos. *Acta Agronómica.* 55(1), pp 43-54.
- Parkinson, K.J. (1981). An improved method for measuring soil respiration in the field. *J. Appl. Ecol.* 18 (1), pp 221-228. doi: <https://doi.org/10.2307/2402491>.
- Payán, F., Jones, D., Harmand, M. and Muschler, R. (2002). Concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo bajo *Erythrina poeppigiana* en plantaciones orgánicas y convencionales de café. *Agroforestería en las Américas.* 9 (35), pp 10 – 15.
- Rendon Schneir, E. (2013). Exportaciones agrarias y gestión sostenible del agua en la Costa Peruana: el caso del valle de Ica. *Sinergia E Innovación.* 1 (08), 30p.
- Rosas, J., Escamilla, E. and Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales de café orgánico. *Terra Latinoamericana.* 26(4), pp 375 - 384
- Ryan, M. and Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring and modelling soil respiration. *Biogeochemistry.* 73, pp 3-27.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. México, 63p.
- Schulte, E.E. and Hopkins, B.G. (1996). Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. SSSA Special Publications, Soil Organic Matter: *Analysis and Interpretation.* 46, pp 21-31. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3>.
- Scholze, M., Knorr, W. and Heimann, M.M. (2003). Modelling terrestrial vegetation dynamics and carbon cycling for an abrupt climatic change event. *The Holocene.* 13 (3), pp 327–333.
- Segura, M., Kanninen, M. and Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agrofor. Syst.* 68(2), pp 143-150. doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>.

- Souza, H.N., de Goede, R.G.M., Brussaard, L., Cardoso, I.M., Duarte, E.M.G., Fernandes, R.B.A., Gomes, L.C. and Pulleman, M.M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agric. Ecosyst. & Environ.* 146(1), pp 179-196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>.
- Strickland, M.S., Thomason, W.E., Avera, B., Franklin, J., Minick, K., Yamada, S. and Badgley, D. (2019). Short-term effects of cover crops on soil microbial characteristics and biogeochemical processes across actively managed farms. *Agrosyst. Geosci. & Environ.* 2(1), pp 1-9. doi: [10.2134/age2018.12.0064](https://doi.org/10.2134/age2018.12.0064).
- Thiele, S., Bloem, J., de Vries, F.T., Kalbitz, K. and Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion Environ. Sustainabil.* 4(5), pp 523-528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>.
- Vallejo, V.E.V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia For.* 16(1), pp 83-99. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia.* 34(5), pp. 322-329.
- Xi, X., Wang, L., Tang, Y., Fu, X. and Le, Y. (2012). Response of soil microbial respiration of tidal wetlands in the Yangtze River Estuary to increasing temperature and sea level: A simulative study. *Ecol Eng.* 49, pp104-111.
- Xu, X., Shi, Z., Chen, X., Lin, Y., Niu, S., Jiang, L., Luo, R. and Luo, Y. (2016). Unchanged carbon balance driven by equivalent responses of production and respiration to climate change in a mixed-grass prairie. *Global Change Biol.* 22(5), 1857-1866. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.13192>.
- Zhou, Z., Wang, C. and Luo, Y. (2018). Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: A global meta-analysis. *Global Ecol. & Biogeography.* 27(1), 110-124. doi: <https://doi.org/10.1111/geb.12663>.

CAPÍTULO V. MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DEL AGUACATE EN LA SUCESIÓN DE ESPECIES Y EL AUMENTO DE TEMPERATURA EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ

Resumen

Los sistemas agroforestales con café en México se caracterizan por su alta diversidad y capacidad para almacenar carbono, y son manejados de manera análoga a la sucesión natural. Las variaciones de la temperatura han generado problemas en la producción que conlleva a utilizar distintas estrategias para contrarrestar los efectos de la temperatura, las cuales pueden afectar a los almacenes de carbono y nitrógeno. Estas estrategias son la introducción de variedades de café con una alta densidad de siembra, podas severas, introducción de aguacate o el cambio a un monocultivo de aguacate. El objetivo fue evaluar el efecto de del aguacate en la sucesión de especies y el aumento de temperatura en los sistemas agroforestales de café. Se utilizó el modelo CENTURY, el cual fue parametrizado con datos meteorológicos del periodo 1945 -2018 y se tomó como línea base los contenidos de C y N para un bosque mesófilo de montaña con información de referencias bibliográficas. Para la comparación entre sistemas se realizó la calibración del modelo en cada sistema con resultados de carbono de biomasa vegetal y suelo, y nitrógeno total del suelo, acumulados durante 21 años para los sistemas renovados y podas severas, y ocho años para el sistema con introducción de aguacate y el monocultivo. Luego se procedió a realizar el experimento de sucesión de especies y aumento de temperatura mínima y máxima para analizar el efecto en los almacenas de C y N de cada sistema. El modelo demostró que el potencial del SCA depende de la introducción de aguacate en la sucesión de especies y del tipo de manejo que se requiere para la producción de aguacate y café de manera simultánea; pero demostró menor capacidad para contrarrestar los efectos de la temperatura que el sistema de café con renovación y alta densidad de plantas.

Palabras clave: almacenes de C, mineralización de N, CENTURY, densidad de siembra

1. Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) son reconocidos en el mundo por su potencial para secuestrar carbono, para producir alimentos, madera, fibras y diversos productos en un mismo espacio. La asociación de árboles y cultivos en los SAF actúan como almacenes de carbono que contribuyen a mitigar los gases de efecto invernadero, mientras que la diversidad de productos permite que los agricultores puedan adaptarse a los impactos generados por las variaciones del clima (Krishnamurthy, Krishnamurthy, Rajagopal *et al.*, 2019). Por esta razón diversos autores consideran a los SAF como una estrategia para reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera y mitigar el cambio climático (De Stefano y Jacobson, 2018).

En México las emisiones de CO₂ fueron de 683 millones de toneladas lo que representa el 1.3 % de las emisiones mundiales; mientras que las emisiones de N₂O fueron de 22 860.1 t, de los cuales el 67.2% se debe a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (SEMARNAT e INECC, 2018).

Uno de los sistemas agroforestales que permite generar alimentos y almacenar carbono es el sistema agroforestal con café (SAFC). Estos SAFC en México se caracterizan por su alta diversidad florística y su capacidad para almacenar entre 132 y 188 Mg C ha⁻¹ (Masuhara *et al.*, 2015).

Los SAF con café en México son manejados de manera análoga a la sucesión natural, es decir, se manejan diferentes especies en sucesión. Estos son denominados como policultivos tradicionales, los cuales se caracterizan por intercalar los cafetos con diversas especies de plantas arbóreas y arbustivas, ya sean nativas e introducidas, que funcionan como sombra, generando un sistema complejo con alta diversidad florística, que proveen alimentos, medicina y materias primas, que son útiles para la subsistencia local (Moguel y Toledo, 1999). Sin embargo, el aumento de temperatura en 1°C en la última década ha generado la proliferación de la roya (*Hemileia vastatrix*) (Granados *et al.*, 2014), lo que ha provocado cambiar el estilo de manejo con alternativas como: la introducción de nuevas variedades de café, podas severas, introducción de aguacate y el cambio de los SAFC a monocultivo de aguacate.

El estilo de manejo y el cambio de los SAFC a monocultivos de aguacate, pueden modificar la sucesión de especies y puede generar pérdida de vegetación, lo que modifica el microclima en el sistema (Sánchez – Reyes, Niño-Maldonado, Barrientos-Lozano *et al.*, 2019). Esto podría cambiar las condiciones de temperatura, reciclaje y demanda de nutrientes (Paolini, 2018) afectando la cantidad y calidad de residuos orgánicos, por consiguiente, la actividad biológica del suelo y a los procesos naturales de la fertilidad del suelo (Vallejos, 2013); los cuales pueden influir en los contenidos de carbono y nitrógeno del sistema agroforestal.

La modificación de la sucesión de especies en el SAFC genera que varios factores cambien simultáneamente, por lo que evaluar el efecto de un factor resulta complejo, para ello, existen modelos basados en la comprensión de diversos procesos que permiten analizar el efecto de cada variación con un

enfoque holístico. Uno de estos es el submodelo planta – suelo – ciclo de nutrientes del modelo Century, este nos ayuda a diferenciar los efectos de los factores individualmente; sin embargo, se debe considerar una calibración con datos observados de C y N de los diferentes componentes de los SAFC para identificar la sensibilidad del modelo ante diversos factores. Bajo este contexto se abordaron las siguientes hipótesis:

1.1. Este modelo basado en biomasa permitirá identificar los procesos que afectan los contenidos de carbono en los sistemas agroforestales con café

La calibración del modelo Century con los diferentes componentes de los SAFC permitirá identificar que estilo de manejo (la introducción de nuevas plantas de café, podas severas, introducción de aguacate, el cambio de los SAFC a monocultivo de aguacate) afecta las variaciones de los contenidos de C y N. Nosotros predijimos que los SAF con podas severas necesitan ajustes en la fracción superficial de N absorbido por residuos debido a que constantemente se pierde N por la constante poda de ramas y hojas, y para los SAF con café y aguacate necesitaría un ajuste en la en la fracción superficial de N absorbido por residuos debido a la demanda N de las plantas, mientras que para el monocultivo de aguacate, además de, ajustar en la fracción superficial de N absorbido por residuos es necesario ajustar la fracción de N del suelo absorbido por residuos. También esperábamos ajustar la tasa de descomposición máxima de la materia orgánica del suelo con rotación lenta y rotación intermedia en el SAFC renovado y los demás SAF, porque estos tienen diferente composición florística y por tanto diferente cantidad y tipo de residuos orgánicos (Vallejo, 2013), lo cual afecta las relaciones de C/N (Gallardo, 2017) por lo que estas tasas de rotación de materia orgánica deberían ajustarse en el modelo.

1.2. La simulación basada en biomasa es sensible a los diferentes patrones de sucesión manejados en los sistemas agroforestales con aguacate y café comparados con los SAF de café tradicionales

Nosotros predijimos que el cambio de sucesión de especies genera variación en el manejo agronómico de los SAF, debido a que se cambian y/o adicionan las especies, en diferente tiempo y densidades de siembra. Nuestra expectativa es que el modelo permitirá comprender como el manejo agronómico durante la sucesión de especies de cada SAF influye en los factores que involucran el aporte de materia orgánica, fertilizantes y las fracciones de nitrógeno que se pierden por absorción de residuos y descomposición de materia orgánica, los cuales generan variaciones en la actividad microbiana que genera nitrógeno disponible para las plantas (Gamarra *et al.*, 2017), y por tanto afecta a la dinámica de carbono y nitrógeno de los sistemas

La modificación de los SAFC genera variaciones en el reciclaje y demanda de nutrientes (Paolini, 2018) diferentes a las de un monocultivo de aguacate. Nuestras hipótesis es que el sistema agroforestal de café y aguacate puede almacenar más C y N debido a que se mantiene la diversidad de especies y además a que su manejo contempla la aplicación de mayor incorporación de

materia orgánica y fuentes de nitrógeno al suelo, a diferencia del monocultivo, cuyas aplicaciones de nutrientes son de origen inorgánico, lo cual no contribuye a la actividad biológica del suelo.

1.3. Efecto del cambio de temperatura en el C y N de los SAF

El efecto del cambio climático ha provocado el aumento de la temperatura, la cual afecta a los procesos fisiológicos en las plantas de café, como la retención o caída de hojas, variaciones en las fechas de floración, fructificación y cosecha, con el aumento de plagas y enfermedades (Granados *et al.*, 2014). Este efecto en los procesos fisiológicos de las plantas influye en los contenidos de C y N del sistema. Nuestra hipótesis es que el aumento de temperatura disminuirá los contenidos de C y N en el suelo debido a que influirá en la producción de residuos orgánicos, la actividad biológica del suelo y en los procesos de descomposición de la materia orgánica (Gómez *et al.*, 2016); mientras que los contenidos de C y N en la biomasa aumentarán en los sistemas que conservan mayor diversidad de especies y una alta densidad de plantas, lo que permite tener capacidad para reducir los efectos de la temperatura a diferencia de los monocultivos (Granados *et al.*, 2014).

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El experimento se realizó en el municipio de Huatusco de Chichuellar, Veracruz (19° 10' 25,00" latitud Norte y 96° 57' 30,00" longitud Oeste), a una altura de 1.300 m.s.n.m. El clima es semicálido húmedo con abundantes lluvias, la temperatura media anual de 16.4 °C y la pluviometría anual de 2018 mm año⁻¹. Los suelos son *Andosoles* (WRB, 2015), estos suelos son de color negro, textura franco arenosa, un pH fuertemente ácido (4.7) y altos contenidos de materia orgánica en el suelo (5.9 %) y de nitrógeno total (0.4 %), de acuerdo con Rosas *et al.* (2008).

La vegetación dominante de la zona es bosque de niebla o de montaña. La agricultura es de temporal lluvioso, siendo el cultivo de café el aprovechamiento general, manejado bajo sombra con árboles, arbustos y herbáceas, en asociación; característica que lo clasifica como policultivo tradicional de café (Rosas *et al.*, 2008). Las principales especies arbóreas en los cafetales son nogal (*Juglans regia* L.), grevillea (*Grevillea robusta*) y Vainillo (*Inga* spp.) (Geissert *et al.*, 2017).

2.2. Sistemas seleccionados

2.2.1. Sistema agroforestal de café renovado (SCR). Este sistema es manejado con 4 000 plantas de café ha⁻¹, con una altura y diámetro promedio de 0.65 y 0.013 m, respectivamente, y 60 árboles de sombra por ha⁻¹, estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp, *Inga* spp y *Grevillea robusta*, con una altura y diámetro promedio de 12.27 y 0.0985 m, respectivamente. La fertilización se realiza con 5 Kg de composta (materia seca) por planta de café, esta composta es previamente enriquecida con residuos de pulpa de café en una proporción de 100 kg

de pulpa por tonelada de composta. Se aplica 8 toneladas de cal agrícola ha^{-1} cada tres años, antes de la renovación y desde hace 10 años. El sistema tiene 21 años de edad sin agregar agroquímico y no realiza control de plagas, enfermedades. El control de arvenses se realiza manualmente con azadón.

2.2.2. Sistema agroforestal de café con podas intensivas (SCP). Este sistema es manejado con 2 400 plantas de café ha^{-1} , con una altura y diámetro promedio de 2.85 y 0.0251 m, respectivamente, y 40 árboles de sombra por ha^{-1} , estos árboles corresponden a las especies de *Junglas* spp e *Inga* spp., con una altura y diámetro promedio de 11.89 y 0.253 m, respectivamente. La fertilización se realiza con 5 Kg de vermicomposta (materia seca) por planta de café. Está vermicomposta es enriquecida con residuos de la pulpa de café en una proporción 10:1. Se aplica 1Kg de cal agrícola por planta de café anualmente. La densidad de sombra es controlada con podas severas, no realiza control de plagas y enfermedades, y el control de arvenses se realiza con desbrozadora. El sistema fue instalado hace 21 años.

2.2.3. Sistema agroforestal de café con introducción de aguacate (SCA). Este sistema es manejado con 1 800 plantas de café y 100 plantas de aguacate (*Persea americana*) ha^{-1} , con cinco árboles de sombra intercalados de diversas especies por ha^{-1} . Lo árboles de aguacate tiene una altura y diámetro promedio de 11.7 cm y 3 m, respectivamente, y las plantas de café 1 cm y 1.6 m, respectivamente. La fertilización consiste en aplicar anualmente vermicomposta enriquecida con micorrizas (un kg de micorrizas por 500 kg de vermicomposta), está es aplicada a una dosis de 15 kg (materia seca) por planta de aguacate y 5 kg (materia seca) por planta de café. Adicionalmente, se incorpora “microorganismos eficientes” (ME), este producto contiene 4.2 % de ácidos húmicos y 0.5 % de ácidos fúlvicos, los cuales contienen: 1.3 % N; 1.2 % P; 2.4 % K; 2.2 % de Ca; 1.7 % Mg; 0.02 % Mn; y 0.02 % B. Estos ME son aplicados a nivel foliar, mensualmente, en dosificaciones de un litro de ME por 200 litros de agua (esté volumen abastece a 50 plantas de aguacate y 900 cafetos). El control de plagas y enfermedades se realiza con trampas de luz nocturna, trampas amarillas y aplicaciones de fungicida compuesto por Cu y Cal hidratada en dosis de un kg de cada uno en 100 L de agua (para 100 plantas de aguacate), las aplicaciones se realizan una vez al mes; para el caso de cafetos no se aplican insumos. El control de arvenses es mecanizado con desbrozadora. El sistema tiene 8 años de instalado.

2.2.4. Monocultivo de aguacate (SMA). Este sistema se consideró como testigo, está conformado por 210 plantas de aguacate (*Persea americana*) por ha^{-1} , las plantas tienen una altura y diámetro promedio de 3 m y 18.5 cm, respectivamente. La fertilización se realiza con agroquímicos que contienen N:P:K (17:17:17) y urea, se aplica 1.4 Kg de cada producto por planta, tres veces por año. Para el control de plagas y enfermedades se aplicó RIDONIL (*Metalaxy Mancozel* (64%) + *metalaxil-M* (4%)) y Thiametoxan

+ Lambdacialotrina (ENGEO), una dosis de 250 ml L⁻¹ cada trimestre. El control de arvenses es con desbrozadora (mecanizado). El sistema tiene 8 años de instalado.

2.3. Diseño experimental

Se tomó como línea base las evaluaciones y determinaciones realizadas durante el periodo 2017 – 2018 en los sistemas agroforestales de Huatusco, Veracruz, México. Estas evaluaciones consistieron en delimitar tres parcelas de 25x25 m² en cada uno de los SAF, donde se evaluaron los parámetros dasométricos en la vegetación para la determinación de C en la biomasa vegetal (CBv) y se tomaron muestras de suelo a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm), por triplicado, las determinaciones de C y N se realizaron en el analizador TOC-L Shimadzu. Se tomó como referencia, las publicaciones sobre los almacenes de carbono para los bosques mesófilos de montaña de Veracruz, este bosque fue considerado como testigo.

2.4. Método de campo y laboratorio

En las parcelas de 25x25 m ó 625m² se procedió seleccionar tres puntos de muestreo, en cada uno se realizó las evaluaciones en la biomasa vegetal y muestreo de suelo para analizar los contenidos de C y N por componente.

Para la biomasa vegetal se consideraron árboles, cafetos, herbáceas, hojarasca, mantillo y raíces. El peso de materia seca (MS) de los árboles y frutales se determinaron mediante ecuaciones alométricas. Para obtener el valor del C en la biomasa se multiplicó por el factor 0.5, basado en el supuesto de que el 50 % de la MS de las especies es C (Gallardo, 2017).

Para la determinación de C y N en suelo primero se determinó la densidad aparente (D_{ap}) en cuadrantes de 1.0x1.0 m² y en las tres profundidades, con el método del cilindro (Page *et al.*, 1982); luego se procedió a determinar materia orgánica del suelo (MOS) conforme a la metodología propuesta por Schulte y Hopkins (1996), la cual consiste en cuantificar la MOS determinando la pérdida por ignición. Los contenidos de COS y NTS se midieron usando un equipo TOC-L Shimadzu. Posteriormente se calculó la relación C/N.

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) a todas las variables ($P < 0,05$), siendo las variables dependientes los sistemas y profundidades, y el resto las variables independientes. Los sistemas y profundidades fueron comparados mediante la prueba HSD de Tukey para cada una de las variables analizadas.

2.5. Modelación

El modelo CENTURY (versión 4.5, *forest mode*) fue utilizado para simular la dinámica de C y N en los SAF analizados. Para ello el modelo fue previamente parametrizado con los datos de temperatura máxima, mínima y de precipitación (1945 -2018) de la base de datos de la estación meteorológica del Municipio de Huatusco, Veracruz, México. Para calibrar el modelo se utilizó la base datos de las investigaciones realizadas en los SAF de Huatusco y para el bosque mesófilo de montaña (BMM) generadas por las publicaciones de Cristóbal *et al.* (2019) y Masuhara *et al.* (2015). Luego se procedió a modelar el crecimiento típico del

BMM considerando la tumba de árboles a través de los años, la introducción de otras especies de árboles y el establecimiento de café y aguacate (CENTURY "Schedule" file), los aportes de C por la incorporación de materia orgánica (astgc, astlbi), el contenido de lignina de la M.O (astlig), la relación C/N de la M.O (astrec(1)), fertilizantes (FERAMT(1), FERAMT(2)), las tasas de descomposición de la materia orgánica (DEC4, DEC5), las condiciones de humedad en el suelo (DECK5), las fracciones de nutrientes absorbidos a nivel superficial y en el suelo (DAMR(1,1), DAMR(1,2), DAMR(2,1), DAMR(2,2)), el efecto de la biomasa en el sistema (PMNTMP), la producción de hojarasca (PMXBIO), los contenidos de lignina (PLIGST(1), PLIGST(2), RSPLIG), las relaciones C/N (VART) de todos los componentes, estas bases de datos se muestran en CENTURY "Fix.100", "Omad.100" and "Fert.100". Este procedimiento se realizó para cada SAF, calibrando el modelo con los valores de la línea base de las determinaciones y evaluaciones realizadas en la investigación durante el periodo 2017-2018; y para parametrizar las condiciones ambientales del modelo se utilizó la base de datos meteorológica del periodo 1945 al 2018, de la estación Huatusco Veracruz operada por CONAGUA, con acceso libre.

Para el experimento 1: la modelación de cada sistema parametrizado con las bases de datos y las condiciones ambientales de Huatusco fueron comparadas para realizar el análisis del efecto de la sucesión de especies. Para ello se consideró el periodo de sucesión de cada especie en cada sistema:

- a. SCR: Permaneció como BMM de 1945 -1984 con la especie *Junglas* spp como dominante, durante el periodo de 1986-1991 se cortaron algunos árboles, de 1991 -1992 se introdujo la especie *Grevillea robusta*, 1993-1996 se introdujo la especie *Inga*, en 1997 se instalaron las plantas de café y en año 2015 se instalaron las plantas de café tolerantes a roya.
- b. SCP: Permaneció como BMM de 1945- 1984 con la especie *Junglas* spp como dominante, en el año 1985 se talaron algunos árboles, durante el periodo de 1986 -1992 se establecieron árboles de *Grevillea robusta*, de 1993-1996 se plantaron árboles de *Inga* spp, en 1997 se instalaron las plantas de café.
- c. SCA: Permaneció como BMM de 1945 -1995, con la especie *Junglas* spp como dominante, en el año 1996 se talaron algunos árboles, en 1997 se establecieron plantas de *Grevillea robusta* y café, en el 2006 se plantaron *Inga* spp y más plantas de café y finalmente en el año 2010 se establecieron las plantas de aguacate, se dejaron las plantas de café y el resto de árboles fueron talados.
- d. SMA: Permaneció como BMM de 1945 -1995, con la especie *Junglas* spp como dominante, en el periodo de 1996 – 2008 se realizó tala de árboles para aprovechar madera, en 2009 se establecieron las plantas de *Grevillea robusta* y en el 2010 se establecieron plantas de aguacate como monocultivo.

Para el caso del bosque se consideró un crecimiento natural de 1945 -2018.

Para el experimento 2: Para evaluar el efecto del incremento de la temperatura en cada sistema se aumentaron las temperaturas máximas y mínimas de todos

los meses (“TMX2M (1-12)” y “TMN2M (1-12)”). Se consideró en aumento de 1, 1.5, 2 y 2.5 °C, basados en la proyección de que el aumento máximo de temperatura para la región sureste de México, será menor a 2.8 °C, según proyecciones realizadas con los escenarios de emisiones medias (A1F) generados por Magaña-Rueda *et al.* (2000). Para obtener las proyecciones de la temperatura se utilizó la base de datos meteorológica de la Estación de Veracruz del periodo de años de 1945 al 2018 (data de acceso libre proporcionada por CONAGUA)

3. Resultados

3.1. Mediciones de carbono en biomasa y suelo, basadas en determinaciones con muestras de campo

El análisis de comparación de medias entre sistemas indica que los contenidos de carbono en la biomasa son semejantes entre SCR, SCA y SMA, mientras que el SCP (sistema con podas severas) fue el que presentó menor contenido de C. Para el C en el suelo a una profundidad de (0-30 cm) el SCA duplicó los valores reportados para los demás sistemas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Carbono en biomasa vegetal y suelo, en Mg C ha⁻¹

Tipo de Sistema	Biomasa (Mg C ha ⁻¹)		Suelo (Mg C ha ⁻¹)
SCR	40±2.6	A	60 ± 3.9 ^B
SCP	16±2.6	B	71± 3.9 ^B
SCA	36±2.6	A	139± 6.1 ^A
SMA	37±2.6	A	74 ± 6.8 ^B
<i>P</i> -valor	0.0007		0,0001
DMS	11.68		22.020

SCR: Sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SAC: Sistema aguacate-café; SMA: monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, *P*-Valor ≤0,05, DMS: Diferencia mínima significativa.

3.2. Mediciones de nitrógeno en suelo y la relación C/N, basadas en determinaciones con muestras de campo

El contenido de nitrógeno en el suelo del SCA superó en 38.5% al monocultivo de aguacate, en 58.11% al SCR y 52.13% al SCP. La relación C/N no tuvo diferencias significativas entre los sistemas y presentó un rango promedio entre 11-14 (Cuadro 2.).

Cuadro 2. Nitrógeno total del suelo in Mg C ha⁻¹ y relación C/N en el suelo

Sistemas	NTS (Mg N ha ⁻¹)	C/N
SCR	4.9 ± 0.37 ^C	12 ± 1.1 ^A
SCP	5.6 ± 0.37 ^{BC}	14 ± 1.1 ^A
SCA	11.7 ± 0.65 ^A	12 ± 2.0 ^A
SMA	7.2 ± 0.65 ^B	11 ± 2.0 ^A
<i>P</i> -valor	0.0001	0.6268
DMS	2.095	6.346

SCR: Sistema agroforestal de café renovado; SCP: Sistema agroforestal de café con limpieza y podas severas; SAC: Sistema aguacate-café; SMA: monocultivo de aguacate; letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, *P*-Valor ≤0,05, DMS: Diferencia mínima significativa.

3.3. Salidas del modelo

3.3.1. Experimento I: Efecto de la introducción de aguacate en la sucesión de especies del sistema agroforestal

La secuencia de especies del SCA presentó 131 % más C en el suelo que el sistema renovado de café con alta densidad de siembra, 87% más que un monocultivo de aguacate, pero menor a de un bosque mesófilo de montaña con crecimiento natural, mientras que en la biomasa presentó valores semejantes a los demás sistemas (Figura 1).

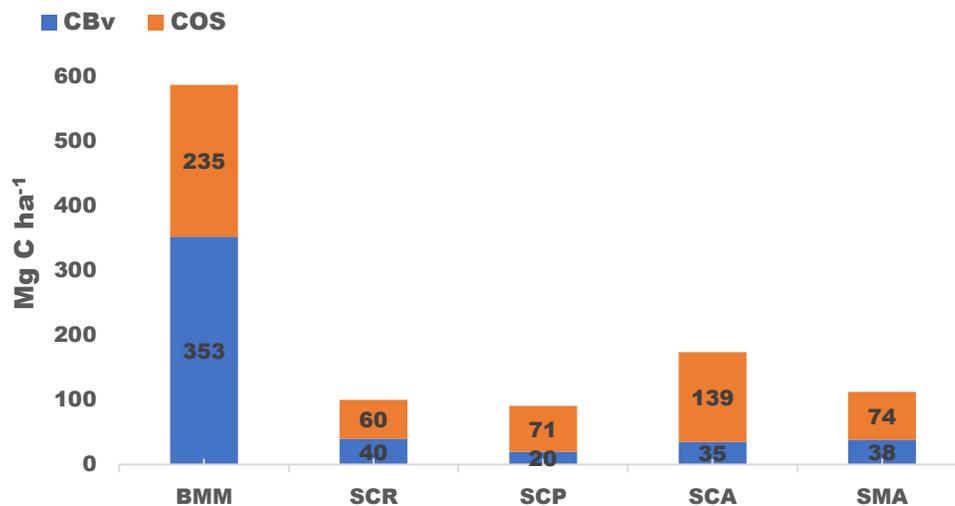


Figura 1. Carbón en biomasa vegetal y suelos por sistema en Mg C ha⁻¹

En relación al N en el suelo el comportamiento fue semejante al de C, el SCA 157.14% más N que un monocultivo de aguacate y 70.59% menos N que un bosque mesófilo de montaña con crecimiento natural, mientras que en la biomasa el modelo indica que la variación es mayor en los sistemas asociados a aguacate y en el sistema renovado con alta densidad de siembra (Figura 2).

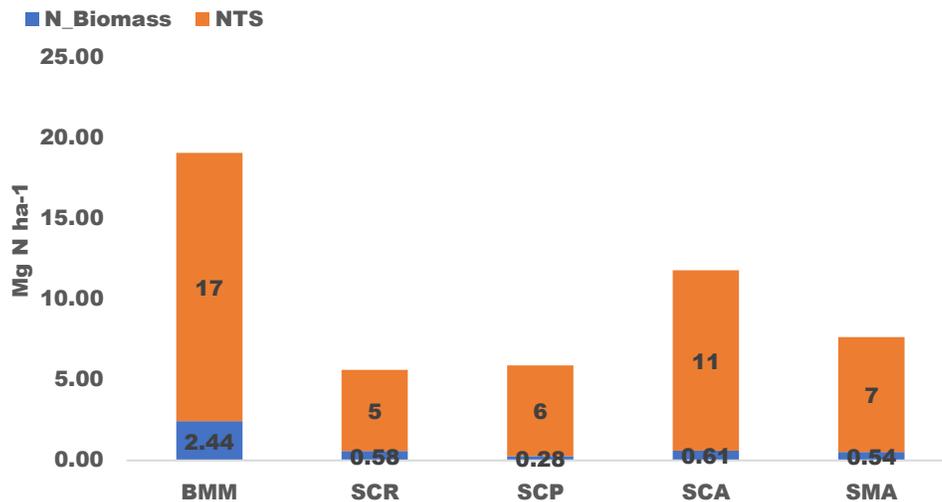


Figura 2. Nitrógeno en biomasa vegetal y suelos por sistema en Mg N ha⁻¹

3.3.2. Experimento II: Efecto del incremento de la temperatura

El incremento de la temperatura generó la disminución del carbono del suelo en los sistemas SCA disminuyó 11.5% respecto al carbono de la línea base, el sistema con limpieza y poda severa (SCP) 9.45% y el monocultivo de aguacate presentó la menor disminución con 8.45%, mientras que en los sistemas con mayor diversificación de especies el carbono aumentó en 6.25 y 8.09 para SCR y el bosque, respectivamente. El mismo comportamiento se observó en el carbono de la biomasa siendo el monocultivo de aguacate el que obtuvo mayor porcentaje de disminución de carbono (52.6%), mientras que el SCR y el bosque aumentaron en 42.5% y 26.6%, respectivamente (Figura 3).

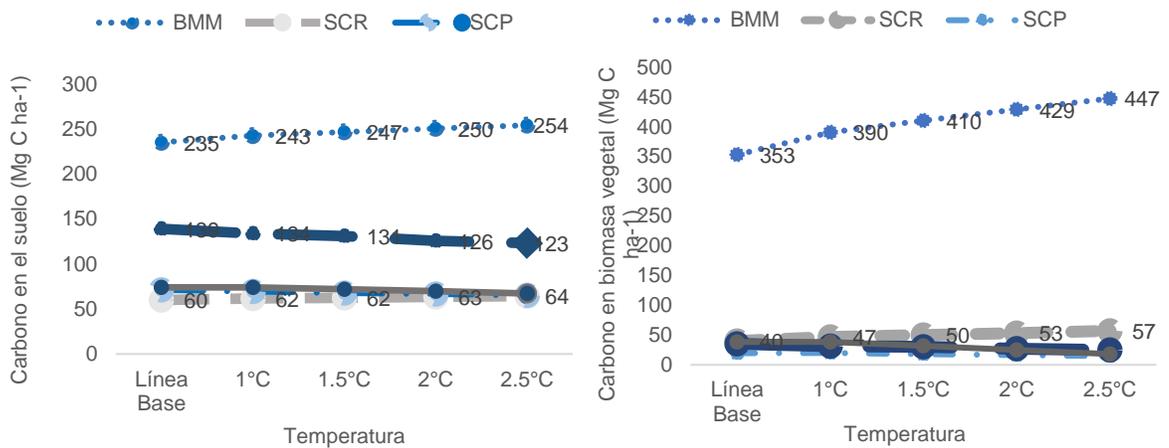


Figura 3. Variación del contenido de carbono en el suelo y la biomasa vegetal, en los sistemas agroforestales con el incremento de la temperatura

La variación del contenido de nitrógeno en el suelo de los sistemas SCP y SCA disminuyó en 9.9 y 16.6%, respectivamente, en el bosque aumento 5.9% y en los sistemas SCR y SMA se mantuvieron los mismos valores de nitrógeno, con el incremento de temperatura. Mientras que para la biomasa el contenido de nitrógeno en el SCA disminuyó en 22.9% y para el monocultivo de aguacate en 46.3%, sin embargo, para el bosque y el SCR aumentó en 24.2 y 31 %, respectivamente.

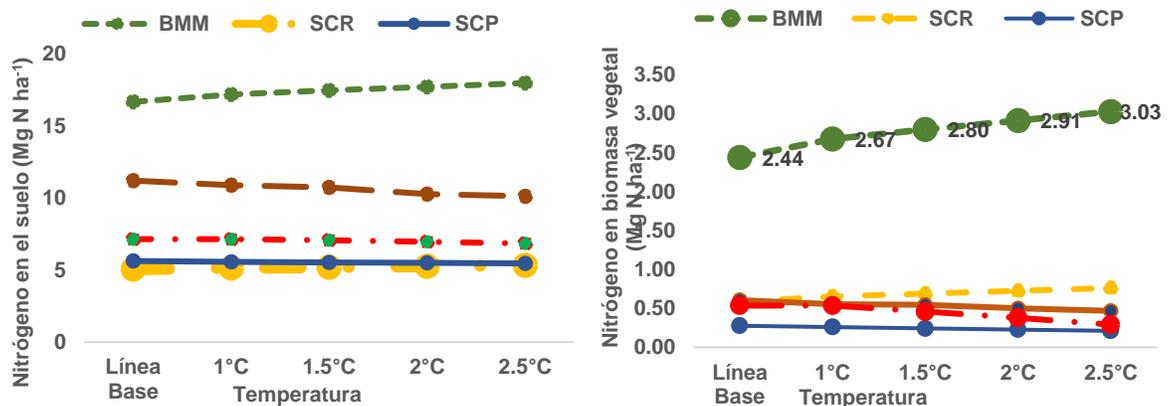


Figura 4. Variación del contenido de nitrógeno en el suelo y biomasa vegetal, en cada sistema agroforestal con el incremento de la temperatura

Las condiciones de temperatura que se generan en el sistema también influye en la respiración biológica del suelo y en la mineralización neta de N en los compartimientos del sistema, siendo el sistema más diversificado y el bosque los que aumentaron en promedio 30% las emisiones de CO₂ y 17% los contenidos de N mineralizado, mientras que los SCA y SCP disminuyeron en promedio 20.4% para CO₂ y 18.5% para los contenidos de N mineralizado, y el monocultivo presentó una disminución de 47.1% para las emisiones de CO₂ y 7.8% para los contenidos de N mineralizado.

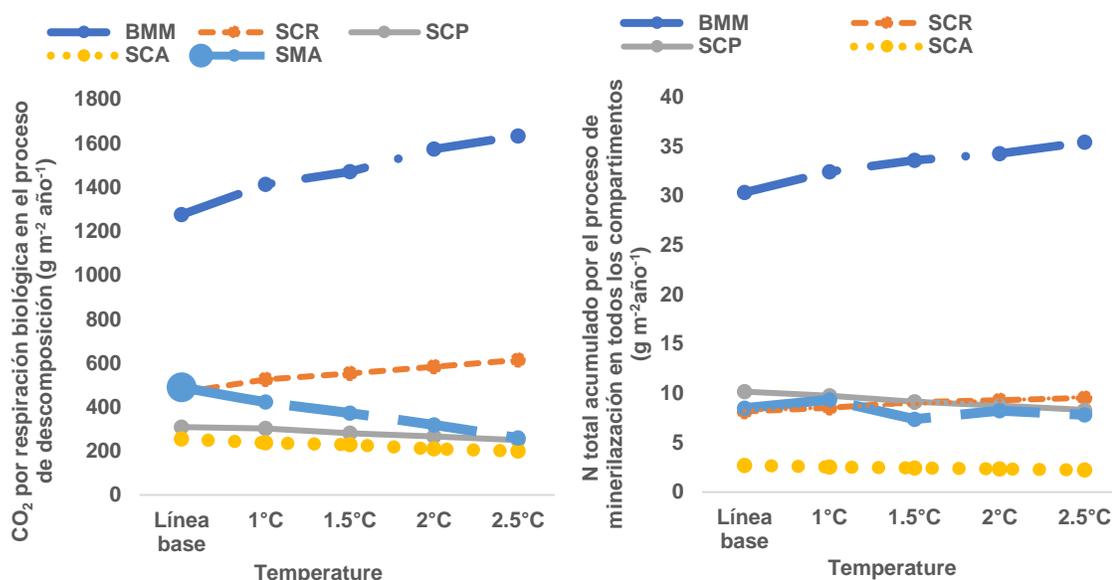


Figura 5. CO₂ por respiración biológica en el proceso de descomposición (g m⁻² año⁻¹) y N total acumulado por el proceso de mineralización en todos los compartimentos (g m⁻² año⁻¹)

4. Discusión

4.1. Procesos que afectan la variación de C y N en los sistemas agroforestales con café

La calibración del modelo Century con los diferentes componentes de los SAFC confirmó que el estilo de manejo que se genera al modificar la sucesión de especies en el sistema afecta al aporte de materia orgánica, al contenido de lignina de la materia orgánica, la relación C/N de la materia orgánica, las tasas de descomposición de la materia orgánica, cuyos valores fueron ajustados de acuerdo con el tipo de fertilización aplicada en cada sistema. Estos ajustes permitieron comprender que la sucesión y la densidad de especies en diferentes momentos genera variaciones en la composición florística de los sistemas que afecta a las condiciones de manejo agronómico.

Este manejo agronómico para el SCP, además de los ajustes anteriores en el modelo requirió modificaciones en las variables humedad del suelo, biomasa del sistema, producción de hojarasca, los contenidos de lignina y las relaciones C/N en todos los componentes, estos ajustes confirman que las podas al dejar ingresar luz afectan la humedad del suelo y alteran la actividad biológica del suelo

(Gallardo, 2017), además disminuye la producción de hojarasca, ya que constantemente se poda y el material que se reincorpora es leñoso, es decir, contiene mayor concentración de lignina la cual afecta a las relaciones C/N, y por tanto en los contenidos de carbono en el suelo y nitrógeno total.

En el SCR se ajustaron todas las variables antes mencionadas, siendo la producción de hojarasca y las tasas de descomposición de materia orgánica, las variables que requirieron ajustarse con valores semejantes a los del bosque mesófilo de montaña. Esto permitió comprender que la alta densidad de especies de café en sistema renovando aumenta la diversidad de cobertura en el sistema, lo cual contribuye a la actividad biológica del suelo (Strickland *et al.*, 2019) y genera variaciones en las tasas de descomposición de la materia orgánica y por tanto en los contenidos de carbono orgánico del suelo y nitrógeno total. Sin embargo, a pesar de su alta densidad de plantas, las variables relacionadas al carbono en biomasa no requirieron ajustes, esto concuerda con Russell and Kumar (2019) quienes indican que las condiciones de manejo que se generan en el sistema con la introducción de plantas leñosas perennes afectan poco a los contenidos de carbono de la biomasa, pero mayor almacenamiento de carbono en el suelo que otros monocultivos. Del mismo modo, Bardgett y van der Putten (2014), indican que el aporte de residuos orgánicos afecta a los procesos biogeoquímicos y, por tanto, a la dinámica del N; que a su vez está relacionada con la calidad de materia orgánica y la relación C/N del suelo, ya que, los procesos de descomposición y mineralización dependen de la estimulación de la actividad biológica del suelo con el aporte de residuos orgánicos frescos (Gamarra *et al.*, 2018).

Mientras que para el SAC las variables que requirieron ajustes superiores a los demás sistemas fueron las relacionadas al aporte de materia orgánica, con la cual se corroboró que los almacenes de carbono en el suelo se ven afectados por la incorporación de vermicomposta, con valores que superan en 64% al monocultivo de aguacate, este comportamiento concuerda con Rusell and Kumar (2019) quienes demostraron que un sistema agroforestal manejado con incorporación de residuos orgánicos y riego almacena más carbono que un monocultivo. Así mismo, las variables relacionadas a las relaciones C/N y las fracciones de nutrientes absorbidos a las primeras capas del suelo permitieron comprender que la adición de vermicomposta además de influir en los contenidos de carbono contribuyen a la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y al ciclo nutrientes en el sistema (Russell and Parton, 2020).

4.2. Sensibilidad del modelo ante los cambios en la sucesión de especies de los sistemas agroforestales

El modelo fue sensible al cambio de sucesión de especies, el cual afectó a la composición florística de los sistemas y al manejo agronómico, estos factores influyeron en las variables de tasa de descomposición de materia orgánica, relación C/N, los cuales generan variaciones en la actividad microbiana que genera nitrógeno disponible para las plantas (Gamarra *et al.*, 2017), y por tanto afecta a la dinámica de carbono y nitrógeno de los sistemas. Lo que permite comprobar que la modificación de los SAFC con la incorporación de otras

especies o la introducción de aguacate altera los procesos de reciclaje de la materia orgánica y la demanda de nutrientes (Paolini, 2018).

Se comprobó la hipótesis de que el cambio de sucesión de especies en el SCA contribuye al almacenamiento de carbono en el suelo y la disponibilidad de nitrógeno, sin embargo, se esperaba que estos resultados serían originados por la diversificación del sistema con dos cultivos como el café y aguacate, cuya producción de biomasa influiría al proceso de reciclaje de residuos orgánicos, que afectan las reservas de carbono orgánico en el sistema (Lozano *et al.*, 2016). El modelo demostró que el factor correspondiente al aporte de materia orgánica a partir de vermicomposta es la que genera las diferencias positivas de carbono y nitrógeno en sistema comparado con los demás sistemas; la aplicación de este material para mantener la producción de ambos cultivos en el sistema genera acumulación de material bioestable o humificado (Gallardo, 2017). Este material humificado permite comprender que la sucesión de especies en el SAC genera un manejo agronómico diferente que repercute en las fracciones de nutrientes absorbidos a nivel superficial, los contenidos de lignina en la materia orgánica y la relación C/N, lo que indica que el modelo considera múltiples factores y permite evidenciar que el potencial de un sistema agroforestal para almacenar carbono depende del tipo de especies con que se realiza la sucesión en el sistema y lo que conlleva el mantenimiento para su producción.

4.3. Efecto del aumento de la temperatura en las concentraciones de C y N de los sistemas agroforestales

El modelo comprobó que el efecto del aumento de la temperatura contribuyó al incremento de las concentraciones de C en el sistema agroforestal renovado, es decir que la introducción de diversas variedades de café y una mayor densidad de vegetación generaron condiciones para reducir los efectos de la temperatura, lo que coincide con Granados *et al.* (2014) quienes indican que a mayor diversidad de especies y cantidad de plantas permite aumentar la capacidad de un sistema para reducir los efectos de la temperatura comparados con los monocultivos. Esta alta densidad de plantas genera mayor cantidad de residuos orgánicos los cuales influyen en la respiración biológica del suelo y en la mineralización neta de N en los compartimientos del sistema, y con el aumento de la temperatura aumentan las emisiones de CO₂ y la mineralización neta del N, sin embargo, los contenidos de N se mantuvieron, este comportamiento se puede atribuir al consumo de nitrógeno por parte de la alta densidad de plantas de cafeto en el sistema.

En los demás sistemas las concentraciones de C y N disminuyeron con el aumento de la temperatura; en el SCP se atribuye a que las podas severas no permiten la producción de biomasa foliar para contrarrestar los efectos de la temperatura, estos efectos aumentan plagas y enfermedades que influyen en la como la retención o caída de hojas, variaciones en las fechas de floración, fructificación y cosecha (Granados *et al.*, 2014) y por tanto en el aporte de residuos orgánicos, así como el proceso de descomposición del material orgánico (Paolini, 2018). Además, este sistema disminuyó las emisiones de CO₂ generadas por la actividad biológica del suelo y los contenidos de N mineralizado,

ante el aumento de la temperatura, lo cual corrobora que las podas severas en el sistema afectan la incorporación de residuos orgánicos que son insumos esenciales para la actividad biológica del suelo.

En el SAC, a pesar del manejo diversificado, se mantiene una menor densidad de plantas, lo que deja espacios para que se evapore la humedad del suelo, contribuyendo al estrés de las plantas que afectan en la producción de biomasa, flores y frutos, y por tanto se exponen las capas superficiales del suelo. Para el caso de este sistema, estas capas contienen materia orgánica estable (vermicomposta), que afectan a los contenidos de carbono de lenta desc, lo que demuestra que a pesar de los beneficios del manejo agronómico para almacenar carbono y los contenidos de nitrógeno en el sistema, contemplar la densidad de vegetación es importante para mantener la humedad del suelo y el aporte de residuos orgánicos, los cuales permiten mantener los almacenes activos de carbono y el proceso de mineralización de nitrógeno, este tipo de almacenes (activo, lento y pasivo) son considerados por el modelo y los relaciona con los comportamientos de materia orgánica, por lo que para comprender los efectos de la temperatura en las relaciones de C, N, planta, con el modelado es necesario considerar la densidad de plantas, la diversidad y el manejo agronómico (Russell and Kumar, 2020).

5. Conclusión

La modelación permitió comprender que la sucesión de especies modificada con la introducción de aguacate, y la disminución de la densidad de plantas de manera secuenciada en diferentes momentos generó modificaciones en la composición florística que afectaron las condiciones de manejo agronómico. El manejo agronómico con vermicomposta, material humificado afectó a las fracciones de nutrientes absorbidos a nivel superficial, los contenidos de lignina en la materia orgánica, la relación C/N, las emisiones de CO₂ generadas por la actividad biológica y al proceso de mineralización, que influyen en los almacenes de carbono y el proceso de mineralización de N. El modelo demostró que el potencial del SCA depende de la introducción de aguacate en la sucesión de especies y del tipo de manejo que se requiere para la producción de aguacate y café de manera simultánea.

El aumento de la temperatura disminuyó los contenidos de carbono y nitrógeno en el SAC, lo que evidencia su baja capacidad a las variaciones de temperatura. Se demuestra que la introducción de aguacate y el manejo agronómico en el SAC no fueron suficientes para mantener las condiciones de humedad en el suelo, la cual es importante para conservar los almacenes de carbono activo y contribuir al proceso de mineralización de N. El SCR fue el que presentó mayor capacidad para contrarrestar los efectos del aumento de la temperatura, lo que evidencia que, además de contemplar la diversidad y el manejo agronómico, es importante considerar la densidad de plantas en el sistema, las cuales contribuyen a mantener la humedad en el suelo.

6. Literatura citada

- Bardgett, R.D. and van der Putten, W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 7528(515), pp 505-511. doi: 10.1038/nature13855.
- Cristóbal, D., Tinoco, J.A., Prado, J.V. and Hernández, E. (2019). Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry, and coffee monoculture systems. *Rev. Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 25(2), pp 169-184. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.070>.
- De Stefano, A., Jacobson, M.G. (2018). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry Systems*, 92, pp 285–299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
- Gallardo, J.F. (2017). La materia orgánica del suelo; residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Mexico. 424 p.
- Gamarra, C.C., Díaz, M.I., Vera, M.P.M. and Nicolás, A.J. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Rev. Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(46), pp 4-26. doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>.
- Geissert, D., Mólgora, A., Negtete, S. and Hunter, R. (2017). Effect of vegetation cover management on water erosion in shade coffee plantations. *Agrociencia*.51(2), 119-133.
- Gómez, L., Cardoso, I.M., Mendonca, E., Fernandes, R.B., Lopes, V. and Oliveira, T. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agric. & For. Meteorol.* 224, pp 30-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>.
- Granados, R., Medina, Ma de la Paz., Peña, V. (2014). Variación y cambio climático en la vertiente del Golfo de México: Impactos en la cafecultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 5 (3), pp 473-485.
- Krishnamurthy, L., Krishnamurthy, K.P., Rajagopal, I., Peralta, A. (2019). Can agroforestry systems thrive in the drylands? Characteristics of successful agroforestry systems in the arid and semi-arid regions of Latin America. *Agroforestry Systems*. 93, pp 503 – 513.
- Lozano, B., Parras, L. and Brevik, E.C. (2016). Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Sci. Total Environ.* 544, pp 963-970. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.022>.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J.C., Salcedo, E.S., Juárez, M.J. and Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Amazónica Ciencia y Tecnología*. 4(1), pp 66-93.

- Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical Properties Second Editions* Madison, Wisconsin, USA. 1159 p.
- Paolini, J.E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*. 36(1), pp 13-22. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>.
- Rosas, J., Escamilla, E. and Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales de café orgánico. *Terra Latinoamericana*. 26(4), pp 375 - 384
- Russell, A. E., Parton, W.J. (2020). Modeling the Effects of Global Change on Ecosystem Processes in a Tropical Rainforest. *Forest*. 10, 803, 16p.
- Russell, A. E., Kumar, B.M. (2019). Modeling Experiments for Evaluating the Effects of Trees, Increasing Temperature, and Soil Texture on Carbon Stocks in Agroforestry Systems in Kerala, India. *Forest*. 11, 213, 17p.
- SEMARNAT e INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018). Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. México, 756p.
- Sánchez – Reyes, U.J., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L., Treviño-Carreón, J., Almaguer-Sierra, P. (2019). Seasonal microclimatic variation in a succession gradient of low thorn forest in Northeastern Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 67 (1), pp 266-277.
- Schulte, E.E. and Hopkins, B.G. (1996). Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. SSSA Special Publications, Soil Organic Matter: *Analysis and Interpretation*. 46, pp 21-31. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3>.
- Strickland, M.S., Thomason, W.E., Avera, B., Franklin, J., Minick, K., Yamada, S. and Badgley, D. (2019). Short-term effects of cover crops on soil microbial characteristics and biogeochemical processes across actively managed farms. *Agrosyst. Geosci. & Environ*. 2(1), pp 1-9. doi: [10.2134/age2018.12.0064](https://doi.org/10.2134/age2018.12.0064).
- Vallejo, V.E.V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia For*. 16(1), pp 83-99. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES ASOCIADOS AL CAFÉ Y AGUACATE: UNA CONTRIBUCIÓN A LA MULTIFUNCIONALIDAD

Resumen

La presión por el cambio a monocultivos de aguacate en los sistemas tradicionales de café en el estado de Veracruz puede generar consecuencias, puesto que este cultivo busca maximizar la rentabilidad financiera sin considerar la sostenibilidad de empleo, gestión, uso de insumos agroecológicos, capacidad de inversión y servicios ecosistémicos. El objetivo fue analizar y priorizar distintos sistemas de producción asociados al cultivo de café y aguacate, mediante dos escenarios: (1) multicriterio, que considera la relación beneficio costo, gastos de mantenimiento y la integración de los criterios de: necesidad de inversión, empleo, gestión, carbono y nitrógeno en biomasa vegetal, biomasa y diversidad de macrofauna del suelo; estos nueve criterios representan las múltiples funciones en las dimensiones: económica, social y ambiental de los sistemas agroforestales y fueron analizadas con el método PROMETHEE, a través del cual se generó un ordenamiento de priorización; (2) el financiero, donde sólo se incluyeron medidas monetarias, con las que se determinó la relación beneficio costo. Los análisis se realizaron en cuatro sistemas: cafetal renovado; cafetal con podas severas; café - aguacate; y monocultivo de aguacate; con información de los ciclos productivos 2017 -2018, 2018-2019 y 2019-2020. En el escenario financiero el monocultivo fue priorizado ante los demás sistemas, lo que evidencia la amenaza del monocultivo para desplazar a los cafetales, si sólo se considera el criterio relación beneficio costo. Mientras que el escenario multicriterio priorizó al sistema café-aguacate, cuyo flujo positivo indica que su diversificación productiva genera ingresos económicos, lo que permite tener la capacidad de inversión para el uso de vermicomposta que influye en los almacenes de carbono y disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Se demuestra que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

Palabras clave: PROMETHEE, multicriterio, diversidad productiva.

1. Introducción

Actualmente en Veracruz los productores de café optan por el cambio de uso del suelo hacia huertas de aguacate, puesto que su producción genera ganancias netas hasta de 4 695.9 \$ t⁻¹, con una producción de 100 kg por planta y una densidad de siembra de 100 plantas por hectárea (Franco *et al.*, 2018), valor que supera los 2 630 \$ ha⁻¹ de ingresos netos generados en cafetales afectados por roya con un rendimiento de 4.5 t ha⁻¹, valorizado a 5 000 \$ t⁻¹, considerando un costo de mantenimiento y cosecha de 19 870 \$ ha⁻¹ (FIRA, 2019).

En Veracruz domina la producción de café cultivado bajo sombra diversificada (Macip y Casas, 2008), estos sistemas son importantes por: la riqueza de su composición florística (Sánchez *et al.*, 2017); la baja inversión en la producción; y el aporte al almacenamiento de carbono y nitrógeno. Sin embargo, esta actividad genera bajos rendimientos para los caficultores de Veracruz. Este problema se atribuye a las variaciones climáticas que han generado la proliferación de roya, lo que los hace vulnerables a la expansión del cultivo de aguacate como monocultivo.

El cambio de sistemas tradicionales de café por sistemas modernos, como el cultivo de aguacate en Veracruz, puede generar consecuencias negativas en la sostenibilidad socioambiental, pues estos sistemas buscan maximizar la rentabilidad financiera sin considerar otros factores fundamentales de carácter social y ambiental.

El tema de los sistemas agroforestales con café ha sido abordado desde diversos enfoques, por ejemplo, existen varios estudios que utilizan las variables socioeconómicas para caracterizar a los productores de café y su relación con su condición actual, recursos locales, acceso a servicios básicos y manejo, con el fin de identificar eslabones de valor (Leiva *et al.*, 2017; Aguirre *et al.*, 2016; Pertuz y Pérez 2017). Del mismo modo, estudios realizados por Escalante y Somarriba (2001), indican que las variables que determinan la tipología de un SAF con café son los costos de fertilización, fungicidas y mano de obra para mantenimiento, y éstas son directamente proporcionales a la composición funcional del dosel de sombra y por tanto son importantes para clasificar a los SAF. Por otra parte, Dussán *et al.* (2006) identificaron que la estructura de los SAF, su producción y productividad dependen de la variable nivel de educación y acceso a la tecnología; del mismo modo, Escamilla *et al.* (2017) indican que los SAF con café en Veracruz debido a sus antecedentes históricos tienen importancia económica, social, cultural y ambiental. Estos estudios evidencian la importancia de las variables socioeconómicas para caracterizar a los SAF con café, determinar su tipología, valorar la importancia de la diversificación productiva, y la aplicación y adopción de tecnología; sin embargo, aún se desconocen la rentabilidad y las variaciones de las variables socioeconómicas y ambientales de los cafetales asociados con aguacate.

La mayoría de los problemas que implican decisiones relacionadas con priorización, clasificación y elección, involucran varios criterios, los cuales se pueden abordar de manera integrada mediante métodos que se agrupan en el

análisis multicriterio (AMC). El AMC ha sido utilizado ampliamente en el sector agrícola como una herramienta que permite organizar los diversos criterios y alternativas, además de apoyar estratégicamente una variedad de decisiones desafiantes de los agricultores (Berbel *et al.*, 2018). Existen estudios de análisis multicriterio que apoyan la toma de decisiones de gestión de regiones agrícolas enteras (Bournaris *et al.*, 2009; Manos *et al.*, 2010), producción de biomasa (Tziolas *et al.*, 2017; Caprara y Martelli, 2016; Kylili *et al.*, 2016), estrategias para conservar la biodiversidad (Moffett y Sarkar 2006), decisión sobre la ubicación del proyecto de cogeneración de biomasa agroforestal (Wu *et al.*, 2019), entre otros. Estos estudios evidencian que el AMC ha permitido integrar múltiples aspectos bajo un enfoque holístico que contribuyen a la toma de decisiones del productor, puesto que esta herramienta permite evaluar los impactos, la selección de criterios, la ponderación y la agregación de indicadores (Finkbeiner *et al.*, 2010) que permite valorar la multifuncionalidad de los sistemas. Sin embargo, la literatura aún no reporta casos de aplicaciones sobre decisiones de sistemas agroforestales con diversificación productiva con café y aguacate que permitan la sostenibilidad de los cafetales afectados por la roya a escala de pequeño productor.

En los últimos años el análisis multicriterio se ha usado en diferentes ramas científicas (Hermann *et al.*, 2007; Maia *et al.*, 2017) debido a su practicidad y utilidad de integración metodológica. Se han implementado varios métodos de AMC para evaluar la sostenibilidad ambiental, económica y social en la producción agrícola. Una de las distinciones entre las categorías de AMC se basa en el enfoque de agregación completa y el enfoque de superación, ya que los métodos interactivos (aproximación de prueba y error) no son aplicables en un análisis multivariado (Benoit y Rousseaux, 2003). Entre los métodos más utilizados, podemos mencionar: Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) (Lipuscek *et al.*, 2010; Myllyviita *et al.*, 2012); métodos de superación (PROMETHEE y ELECTRE) (Kralisch *et al.*, 2013; Castellini *et al.*, 2012); Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) (Dinh *et al.*, 2009; De Luca *et al.*, 2015); Técnica de calificación de múltiples atributos simples (SMART) (Myllyviita *et al.*, 2014); VIKOR (Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) (Falcone *et al.*, 2016); TOPSIS (Técnica de Orden Preferencia Similitud con Solución Ideal) (Karklina *et al.*, 2015).

La ventaja del AMC es que puede integrar aspectos subjetivos económicos, ambientales y sociales a la evaluación de manera objetiva (De Luca *et al.*, 2017; Myllyviita *et al.*, 2014), puesto que pueden normalizarse y ponderarse con la aplicación de diversos métodos como: ELECTRE, PROMETHEE y TOPSIS. La ponderación y normalización a través de estos métodos proporciona transparencia para realizar la interpretación, ya que la implementación sin las subetapas de normalización y ponderación podría revelar problemas para la agregación y la comparación de los resultados (Bengtsson y Steen, 2004).

Electre es un método que se basa en relaciones de superación para decidir acerca de la determinación de una solución, que no necesariamente es óptima, pero puede considerarse satisfactoria, además, este método realiza una

jerarquización de las acciones y alternativas (Roy 1991; Roy y Vanderpooten 1997)

El método TOPSIS permite ordenar preferencias por similitud a la solución ideal, por lo que se toma en cuenta el concepto de ideal, a partir del cual construye un método operativo (Dombi 1995), es decir que la alternativa que guarda menor distancia al valor ideal es la que representa la mejor opción.

El método PROMETHEE, hace uso de criterios, ya que construye al grado de superación entre cada par de acciones ordenadas, tomando en cuenta la diferencia de puntuación que esas acciones poseen respecto a cada atributo; esta valoración puede realizarse a través de funciones de valor posible que son utilizadas de acuerdo con el decisor, quien proporciona umbrales de preferencia e inferencia de acuerdo a los criterios.

Los tres métodos muestran su potencialidad para apoyar a la toma de decisiones, sin embargo, el método PROMETHEE a través de la generación de umbrales de preferencia, puede generar argumentos económicos, sociales y ambientales para analizar las ventajas y desventajas socioeconómicas y ambientales de los sistemas agroforestales con café y los asociados con aguacate. Este método permitirá generar argumentos a través de escenarios considerando un peso porcentual por criterio en cada tipo de sistema, con la finalidad de generar un ranking entre sistemas.

El potencial del método PROMETHEE permitirá analizar y priorizar distintos sistemas de producción asociados al cultivo de café y aguacate, considerando la integración de las diversas funciones de los sistemas para contribuir a la valoración de la multifuncionalidad basada en criterios que generan una caracterización bajo un mismo patrón de comparación y análisis de las relaciones que se dan en un sistema, lo que contribuye a generar estrategias de diversificación productiva que integre variables como: generación de empleo, gestión, necesidades de inversión, los servicios ambientales a través de los contenidos de carbono y nitrógeno generados por la biomasa vegetal, la macrofauna del suelo, que podrían ser alterados al desplazar los cafetales por monocultivos de aguacate. Es por ello que el objetivo de este capítulo fue analizar y priorizar distintos sistemas de producción asociados al cultivo de café y aguacate, en el Municipio de Huatusco, Veracruz, México, mediante dos escenarios: multicriterio (EMC) y financiero (EF), con información de los ciclos productivos 2017 -2018, 2018-2019 y 2019-2020, para evidenciar la amenaza del desplazamiento de los cafetales tradicionales por el cultivo de aguacate y la importancia de usar modelos que permitan integrar múltiples criterios con inclusión de variables que contribuyan a valorar la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y descripción de variables a analizar

El estudio se realizó en el Municipio de Huatusco, Veracruz, donde se seleccionaron cuatro sistemas, considerando los tipos de manejo representativos de la zona: sistema de café renovado con variedades de café tolerantes a roya

(SCR); sistema de café con podas y limpieza severas (SCP); sistema de aguacate con café (SAC); y el sistema con aguacate como monocultivo (SAM).

Cada sistema fue caracterizado a través de entrevistas estructuradas donde se abordaron las variables económicas que corresponden a los costos de instalación, mantenimiento, insumos, cosecha, rendimiento, la calidad de cereza de café y calidad de fruto de aguacate en cada sistema, información con la que se obtuvo la relación beneficio costo y los gastos de mantenimiento anual en cada sistema. Para las variables sociales se consideró la cantidad de jornales para cada una de las actividades realizadas en los sistemas, las tecnologías instaladas y el número de capacitaciones en que participan anualmente. Las variables ambientales fueron el contenido de carbono en biomasa vegetal y suelo, nitrógeno total del suelo, la biomasa y diversidad de macrofauna edáfica. La información para cada una de las variables obtenidas a través de entrevistas corresponde al promedio de los ciclos productivos 2017 -2018, 2018-2019 y 2019-2020, mientras que las variables ambientales se analizaron con las determinaciones de las muestras obtenidas en el periodo productivo 2017 -2018.

Estas variables permitieron obtener nueve criterios, agrupados en tres dimensiones: (1) Financiera, que incluye la Relación Beneficio Costo (RBC) y Gasto de mantenimiento (GM); (2) Social, que contempla la Necesidad de Inversión (NI), Empleo (E) y Gestión para innovar (G); y (3) Ambiental, que considera el contenido de Carbono en biomasa vegetal y suelo (C), contenido total de Nitrógeno en el suelo (N), biomasa de macrofauna del suelo (BMS) y diversidad de macrofauna del suelo (DMS). La metodología para determinar cada criterio se detalla en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Metodologías para determinar los valores de los criterios

Dimensión	Criterios	Metodología
Financiera	Relación Beneficio Costo (RBC)	Análisis financiero del flujo de caja, con una tasa de descuento de 10% y una proyección de 30 años.
	Gasto de mantenimiento (GM)	Costo total para mantener la producción anual, en pesos por hectárea al año de cada sistema evaluado.
Social	Necesidad de inversión (NI)	Monto de capital requerido para desarrollar el proyecto productivo.
	Empleo (E)	Monitoreo de la cantidad de jornales utilizados para el manejo y producción en cada sistema, proyectado a un ciclo productivo de 30 años.
	Gestión para innovar (G)	Contabilización de tecnologías instaladas en cada sistema.
Ambiental	Contenido de carbono en biomasa vegetal y suelo (C)	Metodología propuesta por Masuhara <i>et al.</i> (2015), en donde se consideran ecuaciones alométricas para cada especie arbórea y arbustiva. Y los contenidos de carbono en el suelo se determinaron con el analizador de carbono SHIMATZUD, considerando muestras a tres profundidades en cada sistema y por triplicado.
	Contenido total de nitrógeno en el suelo (N)	Se determinó por el método de Kjeldahl, considerando muestras a tres profundidades en cada sistema y por triplicado.
	Biomasa de macrofauna del suelo (BMS)	Se determinó en función del peso total de los individuos por superficie (m^2), expresado en ($g.m^2$).
	Diversidad de macrofauna del suelo (DMS)	Se determinó en función del número de especies de organismos encontrados en cada uno de los sistemas evaluados.

Elaboración con data de los ciclos productivos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020.

El análisis de la información recabada se desarrolló en el marco de dos escenarios:

- a) Análisis multicriterio (EMC), considera la relación beneficio costo y la integración de aspectos no monetarios considerados en las dimensiones social y ambiental. A cada una de las tres dimensiones se le asignó un mismo peso de importancia (33.33%), quedando los pesos de los distintos criterios de la siguiente manera: RBC (16.67%), GM (16.67%) NI (11.1%), E (11.1%), G (11.1%), C (8.34%), N (8.34%), BM (8.34%), DM (8.34%).
- b) Análisis financiero (EF), en el cual únicamente se considera la relación beneficio costo, basado en medidas monetarias.

2.2. Metodología para análisis del escenario multicriterio

Se utilizó la información recabada en cada uno de los criterios, para cada uno de los sistemas (Cuadro 1), donde se destaca que los criterios GM y NI son los único a minimizar, puesto que será priorizado el sistema con menor gasto de mantenimiento y necesidad de inversión. En este escenario se aplicó el método PROMETHEE II, cuyo acrónimo proviene de sus siglas en inglés (Preference Ranking Organization for Enriched Evaluation). El método se basa en la relación de superación entre las alternativas tomando en cuenta los distintos valores que éstas tienen en cada criterio. Esta versión se distingue de su versión anterior (PROMETHEE I) en que genera un orden completo en la clasificación de las alternativas. El método contempla la estimación de tres componentes básicos que resultan de las comparaciones pareadas entre las distintas alternativas (Ishizaka y Nemery, 2013): Grados de preferencia (P_{ij}^k), Flujos unicriterio ($\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{1n}^1$), y Flujos globales.

Los grados de preferencia (P_{ij}^k) expresan el grado en el cual la alternativa a_i supera la alternativa a_j en el criterio k . El método permite la posibilidad de enriquecer los grados de preferencia mediante el uso de funciones de preferencia. Brans and De Simet (2016) proponen seis funciones para expresar las preferencias. En este estudio se utiliza la función conocida como usual (Figura 1 y Ecuación 1), donde los valores de los umbrales de indiferencia y preferencia son igual a cero, lo que significa que ante la más mínima diferencia positiva en $f_k(a_i) - f_k(a_j)$, el grado de preferencia es (fuerte) igual a 1. Si la diferencia resultara negativa o cero, el grado de preferencia es cero o indiferente.

$$P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{si } f_k(a_i) - f_k(a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{si } f_k(a_i) - f_k(a_j) > 0 \end{cases} \dots \dots \dots (1)$$

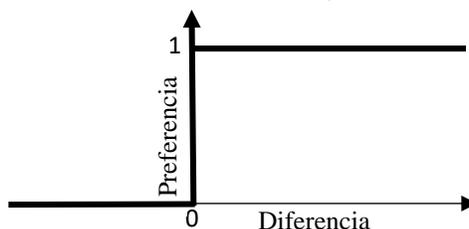


Figura 1. Función de preferencia usual (Brans and De Simet, 2016)

El flujo unicriterio es el promedio de los (P_{ij}^k) para cada alternativa en cada criterio. Se estiman en dos sentidos: el flujo unicriterio positivo ($FUP = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{1n}^k$) y el flujo unicriterio negativo ($FUN = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n P_{n1}^k$). El FUP expresa cómo una alternativa es preferida sobre todas las demás en un criterio en particular. El FUN expresa cómo el resto de las alternativas son preferidas sobre una alternativa en particular. El flujo unicriterio neto (FUNeto) es la diferencia entre el FUP y el FUN.

El flujo global toma en cuenta todos los criterios de manera simultánea, incluyendo sus pesos. Se estiman el flujo global positivo (Φ^+), el flujo global negativo (Φ^-), y el flujo global neto (Φ). Este último determina la clasificación de las alternativas. Esto es,

$$\Phi^+ = w_1 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^1 \right) + w_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \right) + \dots + w_n \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^k \right)$$

$$\Phi^- = w_1 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n P_{ji}^1 \right) + w_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n P_{ji}^2 \right) + \dots + w_n \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n P_{ji}^k \right)$$

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$$

Donde w_i es el peso de importancia del criterio i . La aplicación del método fue desarrollada utilizando el software Smart Picker Pro-versión 4.1.0.

Finalmente, se analizó la estabilidad de los resultados obtenidos mediante el método PROMETHE, se realizaron distintos cambios en los valores de los criterios para los tres primeros sistemas de la clasificación resultante.

2.3. Metodología para análisis del escenario financiero

Se analizó el flujo de caja proyectado a un ciclo de producción de 30 años con una tasa de descuento de 10% para cada sistema, para luego determinar la relación beneficio costo con la información de los ingresos generados por cada producto del sistema y los costos de instalación, mantenimiento, producción y cosecha. Todos estos valores fueron analizados en función de la tendencia de producción anual de cada cultivo del sistema y con el inicio de producción a partir del tercer año de sembrado.

3. Resultados y discusión

3.1. Priorización de los criterios en los sistemas agroforestales para cada tipo de escenario

En el análisis del escenario multicriterio, la determinación de los distintos desempeños de los sistemas en los diferentes criterios incluidos configura una matriz de decisión con las características clásicas de los problemas multicriterio, esto es, ninguno de los sistemas presenta los mejores desempeños en todos los criterios (Cuadro 2). Del mismo modo, tampoco alguno de ellos presenta los

peores valores en todos los criterios, lo que confirma la complejidad presente en el proceso de priorización de este tipo de alternativas, además de evidenciar que los valores de los desempeños de los criterios permitirán identificar las ventajas y desventajas de cada sistema evaluado (Bengtsson y Steen, 2004).

Cuadro 2. Matriz de desempeños de los sistemas en cada criterio

Sistema	RBC	GM	NI	E	G	C	N	BMS	DMS
SCR	1.30	1250	45660	75.33	2	100.00	6.12	124.00	5
SCP	1.06	5012	31740	114.72	1	87.00	6.60	118.11	7
SCA	2.36	2366	41310	70.99	2	175.00	11.88	1.67	2
SMA	2.43	3787	27600	38.43	2	111.00	7.20	1.00	1

Elaboración con data y toma de muestras de los ciclos productivos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020. RBC: relación beneficio costo; NI: Necesidad de inversión; E: empleo; G: gestión; C: carbono en biomasa vegetal y en suelo; N: nitrógeno total del suelo; BMS: biomasa de macrofauna del suelo; DMS: diversidad de macrofauna del suelo. SCR: cafetal renovado; SCP: Cafetal con podas y limpieza severa; SCA: sistema de café y aguacate; SMA: monocultivo de aguacate.

En los resultados del escenario financiero se observa claramente que el sistema con aguacate monocultivo (SAM) tiene la primera posición en la priorización de los sistemas, con una RBC de 2.43, seguido por el sistema de aguacate con café (SAC) con una RBC de 2.30. Los sistemas restantes quedan a mayor distancia con RBC igual o menores a 1.30 (Cuadro 2). Esto da fundamento a la amenaza existente de que, el monocultivo de aguacate, cuyo único criterio de decisión se basa en medidas monetarias, desplace, se establezca y sustituya a los otros sistemas que se caracterizan por incluir aspectos deseables y distintos a lo estrictamente financiero. Estos aspectos deseables como, la diversificación de cultivos y especies, el manejo de tecnologías amigables con el ambiente, como la aplicación de vermicomposta, y consideraciones sociales son características de los sistemas agroforestales con café, clasificados según Escamilla *et al.* (1994) como policultivos tradicionales.

3.2. Clasificación de los sistemas agroforestales con el método PROMETHEE

La estimación de la priorización con el escenario caracterizado por la inclusión adicional de criterios sociales y ambientales, mediante la aplicación del método PROMETHEE, permitió obtener los grados de preferencia, a partir de los cuales se computaron los flujos netos unicriterio (Cuadro 3).

Los criterios de la dimensión económica indican que el sistema que asocia café y aguacate tiene tanto flujo positivo para la relación beneficio costo como para el gasto por mantenimiento, lo que muestra que la introducción de aguacate en un cafetal podría promoverse como una estrategia para contrarrestar el desplazamiento de los cafetales por el monocultivo de aguacate; sin embargo, en los criterio social que corresponde a la necesidad de inversión presentó y gestión generaron un flujo negativo, y se atribuye a que para instalar este tipo de sistema se requiere inversión y la demanda de mano de obra es menor por el tipo de manejo agronómico y la decisión del productor por no incluir la mano de obra de cosecha, puesto que los frutos se venden en planta, es decir que el acopiador se encarga de cosechar. Los valores positivos de los flujos en estos criterios

confirman que la diversificación productiva en un sistema agroforestal como el SAC contribuyen a obtener mayores ingresos en el sistema (Pérez y Garza, 2013)

En los criterios ambientales, los sistemas SCR y SCP presentan valores positivos en los criterios relacionados a macrofauna del suelo, esto se puede atribuir al reciclaje de residuos orgánicos que se genera en ambos sistemas producto de la alta densidad de siembra y las podas severas, que generan residuos orgánicos y condiciones edafoclimáticas que contribuyen a la actividad de la macrofauna del suelo (Paolini, 2018). Mientras que los otros dos criterios ambientales correspondientes a carbono y nitrógeno, presentaron un flujo positivo en los sistemas asociados a aguacate, y los sistemas con mayor densidad de siembra (SCR y SCP) mostraron flujo negativo. Esto evidencia que los contenidos de carbono en el suelo representan valores más altos, por tanto, se confirma que el manejo agronómico con insumos externos como la vermicomposta para el caso del SCA contribuyen a los almacenes de carbono y disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Gallardo, 2017), mientras que para el SMA la incorporación de insumos ricos en nitrógeno y carbono influyen de menor escala.

Cuadro 3. Flujos unicriterio netos

Sistemas	RBC	GM	NI	E	G	C	N	BMS	DMS
SCR	-0.33	1	-1	0.335	0.33	-0.33	-1	0.33	0.33
SCP	-1	-1	0.33	1	-1	-1	-0.33	1	1
SCA	0.33	0.33	-0.33	-0.33	0.33	1	1	-0.33	-0.33
SMA	1	-0.33	1	-1	0.33	0.33	0.33	-1	-1

Elaboración con data y toma de muestras de los ciclos productivos 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020. RBC: relación beneficio costo; GM: gasto de mantenimiento; NI: Necesidad de inversión; E: empleo; G: gestión; C: carbono en biomasa vegetal (árboles y arbustos); N: nitrógeno (herbáceas, hojarasca y mantillo); BMS: biomasa de macrofauna del suelo; DMS: diversidad de macrofauna del suelo. SCR: cafetal renovado; SCP: Cafetal con podas y limpieza severa; SCA: sistema de café y aguacate; SMA: monocultivo de aguacate.

Posteriormente se estimaron los Flujos globales netos, mismos que resultan de la suma ponderada de dichos flujos unicriterio para cada sistema, permitieron definir la clasificación de los sistemas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Clasificación de los escenarios financiero y multicriterio

Sistemas	RBC	Clasificación RBC	Flujo global Neto	Clasificación PROMETHEE	Variación en la posición
SMA	2.43	1	0.0369	2	-1
SCA	2.36	2	0.1853	1	+1
SCR	1.30	3	0.0185	3	0
SCP	1.06	4	-0.2408	4	0

RBC: relación beneficio costo; PROMETHEE: Preference Ranking Organization for Enriched Evaluation. SCR: cafetal renovado; SCP: Cafetal con podas y limpieza severa; SCA: sistema de café y aguacate; SMA: monocultivo de aguacate.

La aplicación del método PROMETHEE generó una clasificación distinta del escenario financiero. Sobresale el ascenso a la primera posición el sistema de café aguacate (SCA), el SMA paso de primera a segunda posición y los otros dos sistemas se mantuvieron en la misma posición. La comparación de ambas

clasificaciones permite evidenciar que el análisis del escenario multicriterio al integrar los criterios de gastos de mantenimiento, sociales y ambientales se tiene valoriza la importancia de mantener los cafetales con la estrategia de introducir aguacate como alternativa al desplazamiento total por monocultivo de aguacates.

En la Figura 2 se presenta gráficamente la clasificación de los sistemas correspondientes al escenario multicriterio. El orden de mayor a menor prioridad va de izquierda a derecha, y las aportaciones de los criterios se muestran en rectángulos de distintos colores que cubren una escala entre -1 y +1. De acuerdo con los resultados, el mejor evaluado es el sistema con café y aguacate, cuyo valor del flujo global neto resulta de la fortaleza en los criterios de relación beneficio costo, gasto de mantenimiento, gestión, carbono y nitrógeno. Estos resultados evidencian que este tipo de sistema requiere inversión para su instalación, la cual compensa los valores positivos en los demás criterios, puesto que influye de manera positiva en manejo agronómico y contribuye a la productividad y por tanto a los ingresos que se generen en el sistema (Jezeer *et al.*, 2018). Además altera las condiciones edafoclimáticas para el desarrollo de la diversidad de la macrofauna, lo que concuerda con Ordóñez *et al.* (2019) quienes confirman que el manejo de estratos diversificados genera variaciones en las condiciones edafoclimáticas.

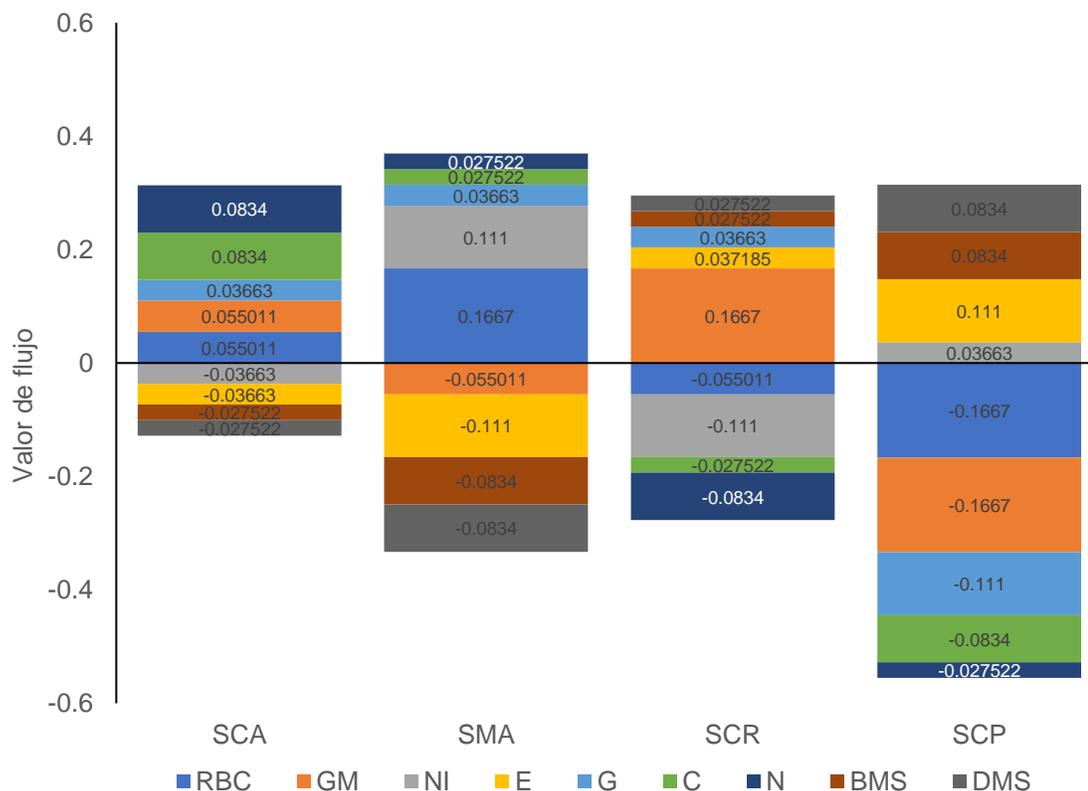


Figura 2. Clasificación de los sistemas incluyendo aportes de los criterios.

RBC: relación beneficio costo; GM: gasto de mantenimiento; NI: Necesidad de inversión; E: empleo; G: gestión; C: carbono en biomasa vegetal y suelo; N: nitrógeno total del suelo; BMS: biomasa de macrofauna del suelo; DMS: diversidad de macrofauna del suelo. SCR: cafetal renovado; SCP: Cafetal con podas y limpieza severa; SCA: sistema de café y aguacate; SMA: monocultivo de aguacate.

Por tanto, estos criterios deben considerarse para promover la diversificación productiva de los cafetales, puesto que la capacidad de inversión del pequeño productor influirá en la programación y decisión de implementar las alternativas de manejo agronómico (Martinelli *et al.*, 2019), que repercutirá en el éxito de la producción e ingreso del sistema como alternativa al monocultivo de aguacate.

El sistema que ocupa la segunda posición es el monocultivo de aguacate (SMA), cuyo criterio de mayor aporte es la relación beneficio costo, este comportamiento se debe a los ingresos económicos que genera por el cultivo de aguacate (Franco *et al.*, 2018).

Mientras que en el sistema de café renovado el flujo negativo se debe a la inversión, pero en este caso el valor negativo indica que se requiere inversión para instalar un sistema con alta densidad de plantas de café, y la relación beneficio costo. Del mismo modo, para el caso del sistema con podas severas, el flujo negativo se debe a los gastos de mantenimiento para las podas y limpieza severa, y la relación beneficio costo. Ambos sistemas muestran deficiencia en la relación beneficio costo, por tanto, es necesario la diversificación productiva o valorizar la producción ofertándola a mercados especializados, para contribuir a la priorización de sistema agroforestales con mejores ingresos económicos (Jezeer *et al.*, 2018).

3.3. Sensibilidad de la clasificación con el método PROMETHE

El análisis de sensibilidad de la clasificación consistió en determinar la estabilidad de los resultados, para ello se realizaron modificaciones en los valores de los desempeños de los sistemas posicionados en los tres primeros lugares de la clasificación a: sistema de café y aguacate (SCA); sistema de aguacate monocultivo (SMA); y sistema de café renovado (SCR). El análisis consistió en estimar el valor crítico de cada criterio en los tres sistemas, entendido éste como el mínimo cambio en el criterio, manteniendo los demás valores constantes, que causa una modificación en la posición del sistema en la clasificación (Triantaphyllou, 2000). Para el SCR, las variaciones en los valores de los criterios se hicieron a la baja con el fin de identificar el punto en que este sistema perdía su primera posición; para los otros dos sistemas (SMA y SCA), las variaciones fueron al alza, para observar el punto en que ascendía su posición, excepto en NI cuya variación fue a la baja por ser un criterio para minimizar.

Los resultados obtenidos indican que este ordenamiento generado por el método PROMETHEE es bastante estable puesto que en la mayor parte de los criterios se requieren variaciones demasiado grandes para provocar un cambio en el mismo (Cuadro 5). Por otro lado, existen porcentaje de variación de criterios iguales a cero, en el criterio NI para el SCR lo que permite confirmar que esté sistema requiere inversión para renovar los cafetales; en el caso del SMA todas las variables económicas y sociales son afectadas si se mejoran los criterios ambientales; mientras que en SCA el criterio gestión, indica que es un sistema que requiere capacidad para instalar tecnologías que permita la producción de café y aguacate en el mismo sistema, mimos que se confirma con el valor porcentual negativo del criterio necesidad de inversión.

Cuadro 5. Sensibilidad de la clasificación resultante del método PROMETHEE

Sistema	Criterio	Valor original de desempeño	Valor crítico de desempeño	Porcentaje de variación	Cambio en la Clasificación PROMETHEE
SCA	RBC	2.36	2.43	3.0	0.5
	GM	2366	2366	0	-1
	NI	41310	4131	-90.0	1
	E	70.99	75.53	6.4	-1
	G	2	2	0.0	0
	C	38.94	175	349.4	0
	N	0.05	11.83	23560	0
	BMS	1.67	162	9600.6	-1
	DMS	2	5	150.0	0
SMA	RBC	2.43	2.43	0.0	0.5
	GM	3787	3787	0.0	-1
	NI	27600	27600	0.0	1
	E	38.43	38.43	0.0	-1
	G	2	2	0.0	0
	C	26.25	111	322.9	0
	N	0.03	7.17	23800	0
	BMS	1	124	12300	-1
	DMS	1	5	400	0
SCR	RBC	1.3	2.36	81.5	-1
	GM	1205	2366	96.3	0.5
	NI	45660	45660	0.0	-1
	E	75.33	75.53	0.3	0.5
	G	2	2	0.0	0
	C	40.79	100	145.2	-1
	N	1.17	4.9	318.8	-1
	BMS	124	162	30.6	0.5
	DMS	5	5	0.0	0

RBC: relación beneficio costo; NI: Necesidad de inversión; E: empleo; G: gestión; C: carbono en biomasa vegetal (árboles y arbustos); N: nitrógeno en herbáceas, hojarasca y mantillo; BMS: biomasa de macrofauna del suelo; DMS: diversidad de macrofauna del suelo. SCR: cafetal renovado; SMA: monocultivo de aguacate; SCA: sistema de café y aguacate.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Cruz Aguilar *et al.* (2016), quienes indican que la inversión es importante para generar beneficios económicos los que influyen de manera positiva en la capacidad del productor para utilizar insumos como la vermicomposta para el caso del SCA, lo que contribuye a la productividad y por tanto a los ingresos que se generen en el sistema (Jezeer *et al.*, 2018).

La estabilidad del ordenamiento confirma que el análisis multicriterio prioriza al sistema agroforestal con café y aguacate, lo que indica que este escenario contempla el valor de todos criterios de las dimensiones ambiental, social y económica; lo que indica que un sistema agroforestal manejado con fundamentos agroecológicos (aplicación de vermicomposta) y diversificado contribuye a generar alternativas de oferta y mercado para mejorar la rentabilidad de los sistemas a productores de pequeña escala (Montiel *et al.*, 2008).

3.4. La contribución de escenario multicriterio a la valorización de la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales

Los resultados muestran que el análisis del escenario multicriterio permite valorar las múltiples funciones de los sistemas agroforestales con la integración de los criterios asociados a las dimensiones ambiental y social. La priorización del sistema agroforestal con café y aguacate indica que la multifuncionalidad de un sistema es importante para contribuir a la conservación de los cafetales ante la amenaza de un monocultivo con alto valor comercial como es el aguacate (Franco *et al.*, 2018).

La diversificación productiva en el sistema café aguacate permite priorizar a este sistema sobre un monocultivo de aguacate, considerando una rentabilidad y productividad semejante a un monocultivo, estos resultados concuerdan con el análisis realizado por Montiel *et al.* (2008) para sistemas agroforestales diversificados con café-aguacate-guayaba.

La priorización del sistema agroforestal con café y aguacate en el escenario multicriterio demuestra que el criterio de necesidad de inversión es deficiente, y es debe tomar especial atención puesto que este valor de flujo negativo se debe a que, para lograr la productividad y mantener los criterios socioambientales en el sistema se requiere de inversión (Cruz Aguilar *et al.*, 2016).

Estos beneficios económicos, sociales y ambientales confirman que las múltiples funciones que caracterizan la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales de café – aguacate permiten: (1) conservar la agrobiodiversidad florística, para que el productor cuente con la oferta de diversos productos, (2) generar mejores ingresos económicos, con la introducción de cultivos con alto valor comercial como el aguacate, (3) manejar la inversión para disminuir los gastos de mantenimiento a largo plazo, (4) promover el uso de insumos agroecológicos como la vermicomposta, que generan variaciones en los almacenes de carbono y disponibilidad de nitrógeno en el suelo, que influyen en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos . Los cuatro aspectos mencionados contribuyen a tomar en cuenta la multifuncionalidad para priorizar el sistema agroforestal con café y aguacate sobre el monocultivo de aguacate.

4. Conclusión

El análisis tradicional basado solo en medidas monetarias y de la relación beneficio costo, demuestra que la rentabilidad financiera obtenida en el sistema de monocultivo de aguacate es muy superior a la obtenida en los otros sistemas.

El análisis multicriterio priorizó al sistema agroforestal café aguacate sobre el monocultivo con un flujo neto positivo que permitió resaltar la importancia de la diversificación productiva en el sistema. Por tanto, se evidencia que la introducción de aguacate generó ingresos económicos que permitieron al pequeño productor tener mayor capacidad de inversión y optar por el uso de insumos agroecológicos como la vermicomposta que influyen en los almacenes

de carbono y nitrógeno del suelo. Todos estos aspectos demostraron que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

5. Literatura citada

- Berbel, J.; Bournaris, T.; Manos, B.; Matsatsinis, N. y Viaggi, D. (2018). *Multicriteria Analysis in Agriculture: Current Trends and Recent Applications*. Berbel, J., Bournaris, T., Manos, B., Matsatsinis, N., & Viaggi, D. (Eds.). First edition. Springer. Switzerland. 328 p.
- Bengtsson, M. & Steen, B. (2004). Weighting in LCA-approaches and applications. *Environmental Progress*. 19 (4), pp 101–109. <https://doi.org/10.1002/ep.670190208>.
- Benoit, V. & Rousseaux, P. (2003). Aid for aggregating the impacts in Life Cycle assessment. *International Journal of life cycle assessment*. 8 (2), pp74-89. <https://doi.org/10.1007/BF0297843>.
- Brans, J.P.& De Smet, Y. (2016). Promethee methods. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer (Ed). Fifth edition. New York, USA. 195 p. doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- Bournaris, T.; Papathanasiou, J., Moulogianni, C. & Manos, B. (2009). A fuzzy multicriteria mathematical programming model for planning agricultural regions. *New Medit*. 8(4), pp22–27.
- Caprara, C. & Martelli, R. (2016). Multi-criteria analysis of suitability for energy crops under structural and environmental constraints: A case study in a northeastern Italian region. *Transactions of the ASABE*. 59(4), pp 815–828. doi: 10.13031/trans.59.11229
- Castellini, C., Boggia, A., Cortina, C., Dal Bosco, A., Paolotti, L., Novelli, E. & Mugnai, C. (2012). A multicriteria approach for measuring the sustainability of different poultry production systems. *Journal of Cleaner Production*. 37, pp 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.006>
- De Luca, A. I., Iofrida, N., Strano, A., Falcone, G. & Gulisano, G. (2015). Social life cycle assessment and participatory approaches: A methodological proposal applied to citrus farming in Southern Italy. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 11(3), pp 383–396. <https://doi.org/10.1002/ieam.1611>
- De Luca, A. I., Iofrida, N., Leskinen, P., Stillitano, T., Falcone, G., Strano, A. & Gulisano, G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of the Total Environment*. 595(1), pp 352–370. ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.284>
- Dinh, L. T. T., Guo, Y. & Mannan, M. S. (2009). Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making. *Environmental*

- Dussán, LC., Duque, OH., González, LJ. (2006). Caracterización tecnológica de caficultores de economía campesina, de los principales municipios cafeteros de Colombia. *Cenicafé*. 57(3), pp167-186.
- Escalante, M. y Somarriba, E. (2001). Diseño y manejo de los cafetales del Occidente de El Salvador. CATIE, Turrialba (Costa Rica). *Agroforestería en las Américas*. 8 (30), pp12 -16. <http://hdl.handle.net/11554/6061>
- Escamilla, E., Licon, A.L., Díaz, S., Sontoyo, H.V., Sosa, R., Rodríguez, L. (1994). Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. *Revista de Historia*. UNA (30), pp 41-67.
- Escamilla, E., Díaz, S., Castillo, G. (2017). La cafecultura de Veracruz (Capítulo 7). En: Carillo, S.H y Libert, A. (Coordinadores). Experiencias productivas en México del siglo XXI. Colección Encuentros. Universidad Intercultural del Estado de Hidalgo. Tenango de Doria, Hidalgo, pp 161 -179.
- Falcone, G., De Luca, A., Stillitano, T., Strano, A, Romeo, G. & Gulisano, G. (2016). Assessment of environmental and economic impacts of vine-growing combining life cycle assessment, life cycle costing and multicriterial analysis. *Sustainability*. 8(8), pp 793- 827. <https://doi.org/10.3390/su8080793>
- Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A. & Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*. 10 (2), pp 3309–3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2016). Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. Café 2016. Documento técnico de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. México, 37p.
- Franco, M., Leos, J., Salas, J., Acosta, M. y García, A. (2018). Análisis de costos y competitividad e la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(2), pp 391-403. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1080>
- Gallardo, J.F. (2017). La materia orgánica del suelo, residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Gallardo, J.F(ed). Universidad Autónoma Chapingo. México. 424p.
- Hermann, B. G., Kroeze, C. & Jawjit, W. (2007). Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*. 15(18), pp 1787–1796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.04.004>
- Ishizaka, A. and Nemery, P. (2013). Multi-criteria decision analysis: methods and software. John Wiley & Sons (Eds). First edition. Chichester, West Sussex, PO 19 8SQ, United Kingdom. 296 p. ISBN:9781118644898. doi:10.1002/9781118644898

- Jezeer, R.E, *et al.* (2018). Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agricultural Systems*. 162, pp179-190.
- Karklina, K., Slisane, D., Romagnoli, F. & Blumberga, D. (2015). Social life cycle assessment of biomethane production and distribution in Latvia. *Environment. Technology. Resources*. II: 128–132. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia. <https://doi.org/10.17770/etr2015vol2.628>
- Kralisch, D., Staffel, C., Ott, D., Bensaid, S., Saracco, G., Bellantoni, P. & Loeb, P. (2013). Process design accompanying life cycle management and risk analysis as a decision support tool for sustainable biodiesel production. *Green Chemistry*. 15(2): 463 - 477. <https://doi.org/10.1039/C2GC36410G>
- Kyllili, A., Christoforou, E., Fokaides, P. A. & Polycarpou, P. (2016). Multicriteria analysis for the selection of the most appropriate energy crops: The case of Cyprus. *International Journal of Sustainable Energy*. 35(1): 47–58. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.898640>
- Leiva, S.T., Román, A. y Rubio, K.B. (2017). Caracterización socioeconómica de la producción cafetalera en la provincia de Rodríguez de Mendoza (Amazonas, Perú). *Agroproducción Sustentable*. 1(3), pp 59-67. doi: 10.25127/aps.20173.375
- Lipuscek, I., Bohanec, M., Oblak, L. & Zadnik Stirn, L. (2010). A multi-criteria decision-making model for classifying wood products with respect to their impact on environment. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 15(4), pp 359–367. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0157-6>
- Macip, R. y Casas, G. (2008). Los cafetales en México y su importancia para la conservación de los anfibios y reptiles. *Acta Zoológica Mexicana*. 24 (2), pp 143 – 159. <https://doi.org/10.21829/azm.2008.242710>
- Maia Angelo, A. C., Saraiva, A. B., Clímaco, J. C. N., Infante, C. E. & Valle, R. (2017). Life cycle assessment and multi-criteria decision analysis: Selection of a strategy for domestic food waste management in Rio de Janeiro. *Journal of Cleaner Production*. 143(1), pp 744–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.049>
- Manos, B., Papathanasiou, J., Bournaris, T. & Voudouris, K. (2010). A multicriteria model for planning agricultural regions within a context of groundwater rational management. *Journal of Environmental Management*. 91(7), pp 1593–1600. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.002>
- Manos, B., Bournaris, T., Chatzinikolaou, P., Berbel, J. & Nikolov, D. (2013). Effects of CAP policy on farm household behaviour and social sustainability. *Land Use Policy*. 31, pp166–181. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.12.012>

- Martinelli, G. do C. *et al.* (2019). Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil. *Land Use Polic.* 80, 274-286.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J.C., Salcedo, E.S., Juárez, M.J., and Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Amazónica Ciencia y Tecnología.* 4(1), pp 66-93.
- Myllyviita, T., Holma, A., Antikainen, R., Lähtinen, K. & Leskinen, P. (2012). Assessing environmental impacts of biomass production chains – Application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Journal of Cleaner Production.* 29, pp 238–245. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.019>
- Myllyviita, T., Leskinen, P. & Seppälä, J. (2014). Impact of normalization, elicitation technique and background information on panel weighting results in life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment.* 19 (2), pp 377–386. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0645-6>
- Moffett, A. and Sarkar, S. (2006). Incorporating multiple criteria into the design of conservation area networks: A mini review with recommendations. *Diversity and Distributions.* *Diversity Distrib.* 12 (2), pp 125-137. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2005.00202.x>
- Montiel, G. *et al.* (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana.* 26(1), pp 85-90.
- Ordóñez, H. R. O., Estrada, J. F. N., Possú, W. B. (2019). Tipificación de sistemas de producción de café en La Unión Nariño, Colombia. *Temas Agrarios.* 24(1), pp 17-26.
- Paolini, J.E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana.* 36(1), pp 13-22. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>.
- Pertuz, V.P. y Pérez, A. B. (2017). Caracterización socioeconómica de los productores de cafés especiales de Pueblo Bello (Cesar, Colombia). *Punto de Vista.* 8 (11), pp 117-140.
- Pérez, V., Garza, G. (2013). Evaluación de la sustentabilidad del sistema de manejo de café orgánico en la unión de ejidos Majomut, región de los Altos de Chiapas. En: Masera, O., López, S. (Eds). *Sustentabilidad y Sistemas campesinos: Cinco experiencias de evaluación en el México rural.* Mundi-Prensa México, 45-81 pp.
- Roy B. (1991). Decision-Aid and Decision Making. *European Journal of Operational Research.* 45, pp 24-331.
- Roy B and Vanderpooten D. (1997). An overview on "The European school of MCDA: Emergence, basic features and current Works. *European Journal of Operational Research.* 99 (1), pp 26-27.

- Sánchez, S., Mendoza, M.A. y García, R.V. (2017). Diversificación de la sombra tradicional de cafetales en Veracruz mediante especies maderables. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 8 (40), pp 7-17. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.32>
- Triantaphyllou, E. (2000). A Sensitivity Analysis Approach for MCDM Methods. In: Multi-criteria Decision-Making Methods: A Comparative Study. Applied Optimization. Springer (Ed). Firth edition. Boston, MA. 44, 290p. doi: 10.1007/978-1-4757-3157-6
- Wu, Y., Yan, Y., Wang, S., Liu, F., Xu, C. and Zhang, T. (2019). Study on location decision framework of agroforestry biomass cogeneration project: A case of China. *Biomass and Bioenergy*. 127, pp 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105289>.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES GENERALES

En el capítulo uno el análisis del estado del arte permitió justificar los objetivos específicos de la investigación y estructura la investigación en cuatro capítulos, que corresponde a la demanda de investigación detectada para carbono y nitrógeno en SAF con café en México, los capítulos fueron: (1) identificar las variables socioeconómicas que modifican las características del manejo agronómico del sistema de producción aguacate-café y que repercuten en el almacenamiento de C y N de los compartimientos de biomasa vegetal y suelo; (2) analizar la variación de la actividad biológica del suelo y su impacto en la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café modificados con la introducción de aguacate; (3) Evaluar el efecto del aguacate en la sucesión de especies y el aumento de temperatura en los sistemas agroforestales de café; (4) Analizar y priorizar los cuatro sistemas evaluados, mediante dos escenarios: multicriterio (EMC) y financiero (EF).

En el capítulo dos se concluyó que el análisis de las variables socioeconómicas permitió detectar que las variables sociales, acceso a la capacitación, capacidad para la organización, mano de obra, nivel de educación y tipo de compradores. las variables económicas, costos por inversión en abonos, control de arvenses, manejo sanitario y servicios para el mantenimiento, fueron las que explicaron la variación del manejo agronómico en los sistemas estudiados. La comparación de estas variables entre los sistemas evidenciaron que, la variación del manejo agronómico en el sistema SCA es sensible a las variaciones de inversión en insumos esporádicos, diversidad de mercado y acceso a recursos de educación, variables que afectaron al manejo con la incorporación de material orgánico externo generado por abonos orgánicos y por tanto explican las variaciones en los contenidos de N en el sistema, CBV y COS, mientras que los contenidos de C acumulado en el sistema no fueron afectados por las variables de manejo agronómico.

Por tanto, el manejo agronómico del SCA permitió mantener los almacenes de CBV y COS, con valores superiores a los cafetales comerciales y valores de NTS semejantes a los policultivos tradicionales de café, pero superiores en COS.

En el capítulo tres se concluyó que las variables que permiten explicar la variación de la respiración del suelo están relacionadas con el N aportado al suelo, por lo que un cambio de la composición florística de un cafetal genera variaciones en el funcionamiento del sistema. Como consecuencia, la respiración del suelo es más intensa en los sistemas de café renovados y con limpieza severa, y se atenúa al introducir aguacate. Del mismo modo, se demostró que la macrofauna del suelo depende fuertemente de la existencia de hojarasca permanente; la desaparición de la subcapa *F* al introducir el aguacate, origina un empobrecimiento de la macrofauna del suelo, por lo que el sistema con aguacate introducido se comporta como un sistema con manejo intensivo.

El análisis de componentes principales indica que casi la mitad de la variación de la dinámica de C y N depende directamente de la relación positiva entre la

respiración del suelo, C y N existente como residuos orgánicos (Capa L y Capa F) y negativa con las variables relacionadas con C y N del suelo.

En el capítulo cuatro, la modelación permitió comprender que la sucesión de especies modificada, con la introducción de aguacate y la disminución de la densidad de plantas de manera secuenciada en diferentes momentos generó modificaciones en la composición florística que afectaron las condiciones de manejo agronómico. El manejo agronómico con vermicomposta (materia orgánica estable) afectó a las fracciones de nutrientes absorbidos a nivel superficial, los contenidos de lignina en la materia orgánica, la relación C/N, las emisiones de CO₂ generadas por la actividad biológica y al proceso de mineralización, que influyen en los almacenes de carbono y el proceso de mineralización de N. El modelo demostró que el potencial del SCA depende de la introducción de aguacate en la sucesión de especies y del tipo de manejo que se requiere para la producción de aguacate y café de manera simultánea.

El aumento de la temperatura disminuyó los contenidos de carbono y nitrógeno en el SAC, lo que evidencia su baja capacidad para contrarrestar las variaciones de temperatura. Se demuestra que la introducción de aguacate y el manejo agronómico en el SAC, no fueron suficientes para mantener las condiciones de humedad en el suelo, la cual es importante para conservar los almacenes de carbono activo y contribuir al proceso de mineralización de N. El SCR fue el que presentó mayor capacidad para contrarrestar los efectos del aumento de la temperatura, lo que evidencia que, además de contemplar la diversidad y el manejo agronómico, es importante considerar la densidad de plantas en el sistema, las cuales contribuyen a mantener la humedad en el suelo.

En el capítulo cinco, el análisis y priorización de los sistemas demostró que el escenario tradicional, basado solo en variables económicas y de la relación beneficio costo, prioriza al sistema de monocultivo de aguacate, mientras que, el análisis multicriterio priorizó al sistema agroforestal café aguacate sobre el monocultivo, con un flujo neto positivo que permitió resaltar la importancia de la diversificación productiva en el sistema. Por tanto, se evidencia que la introducción de aguacate generó ingresos económicos que permitieron al pequeño productor tener mayor capacidad de inversión y optar por el uso de insumos agroecológicos como la vermicomposta que influyen en los almacenes de carbono y nitrógeno del suelo. Todos estos aspectos demostraron que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

Por tanto, el manejo del sistema agroforestal con café y aguacate requiere considerar inversión en insumos esporádicos, adición de vermicomposta y otros bioinsumos, diversidad de mercado y acceso a recursos de educación, condiciones que afectaron a la respiración del suelo por la variación del aporte de insumos y de residuos orgánicos, los cuales afectaron positivamente a los contenidos de C y N en el suelo, mientras que el C y N en la biomasa vegetal el comportamiento fue semejante a la de un cafetal sin aguacate. Los resultados del modelo Century demostraron que el potencial del SCA para almacenar C y N

depende de la introducción de aguacate en la sucesión de especies y del tipo de manejo que se requiere para la producción de aguacate y café de manera simultánea; sin embargo, con el aumento de la temperatura disminuyó los contenidos de carbono y nitrógeno, lo que evidencia su baja capacidad para adaptarse a las variaciones de temperatura. A pesar de esta baja capacidad, los resultados del modelo PROMETHEE indicaron que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

La conclusión general obtenida en este trabajo de investigación, evidencia la importancia de detectar las necesidades de investigación para estructurar los capítulos de la investigación, los cuales abordaron la dinámica de carbono y nitrógeno en los sistemas agroforestales con café renovados, con podas severas, con la introducción de aguacate y comparados con una huerta de aguacate; cuyos resultados demostraron que el sistema aguacate – café tiene mayor contenido de carbono en el suelo por el tipo de manejo agronómico, el cual corresponde a la incorporación de vermicomposta (materia orgánica estable) que, explica las bajas concentraciones de CO₂ emitidas por la respiración del suelo; mientras que las concentraciones de C en la biomasa vegetal y los contenidos de N tuvo el mismo comportamiento que en el sistema de café renovado. La proyección con el modelo Century demostró que el potencial del SCA depende de la introducción de aguacate en la sucesión de especies y del tipo de manejo que se requiere para la producción de aguacate y café de manera simultánea; y con el aumento de la temperatura disminuyeron los contenidos de carbono y nitrógeno en el SAC, lo que evidencia su baja capacidad para contrarrestar las variaciones de temperatura. Con el análisis multivariado se demostró que las múltiples funciones que caracterizan a la multifuncionalidad de un sistema de café diversificado con aguacate, contribuyen a conservar los cafetales ante la amenaza de un monocultivo.

Finalmente, los modelos desarrollados en esta investigación podrían considerarse como línea base para desarrollar investigaciones en otro tipo de sistemas agroforestales y con otra escala de análisis (a nivel municipal o regional) para contribuir a la toma de decisiones de *¿qué tipo de agroecosistemas se debe fomentar para el desarrollo de cierta localidad?*

CAPÍTULO VIII. ANEXOS

ANEXO 1. Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945 – 2018, continua

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	1945	58.97	0.00	17.68	0.00	124.67	288.00	329.29	549.81	212.13	240.90	11.03	18.67
TMIN	1945	18.18	23.18	29.29	30.72	29.15	30.03	30.35	25.58	25.97	23.19	20.80	18.89
TMAX	1945	9.55	11.05	13.03	15.85	14.68	16.03	15.03	13.98	14.75	13.74	11.37	10.16
PRCP	1946	51.61	61.43	25.81	214.13	136.13	194.40	180.65	326.45	136.00	153.55	57.33	0.00
TMIN	1946	18.39	21.36	28.69	28.47	30.34	27.17	27.32	26.84	27.32	26.16	24.90	23.52
TMAX	1946	10.48	10.64	11.16	13.00	16.63	14.95	15.13	16.26	17.03	15.90	15.13	12.29
PRCP	1947	14.19	66.43	41.68	22.00	82.32	58.67	92.26	162.58	195.33	206.67	86.00	40.00
TMIN	1947	19.31	19.18	24.68	29.65	26.10	28.67	27.03	26.92	25.65	23.45	21.73	18.10
TMAX	1947	10.39	9.79	11.40	14.60	15.68	15.20	14.45	14.16	14.57	14.29	12.67	10.45
PRCP	1948	39.35	19.31	39.35	8.00	113.55	116.67	66.45	124.52	84.00	40.00	8.67	15.48
TMIN	1948	16.71	21.45	29.13	28.50	27.71	26.63	27.29	28.42	25.33	23.03	21.07	20.10
TMAX	1948	9.23	10.69	13.32	13.07	15.00	14.90	14.90	14.39	14.63	13.81	12.80	10.52
PRCP	1949	29.68	22.86	82.00	16.67	35.60	133.33	41.94	66.67	168.97	97.42	0.00	36.77
TMIN	1949	19.42	21.14	28.74	27.00	29.13	27.77	28.48	28.26	25.20	23.39	17.90	19.00
TMAX	1949	10.06	10.57	13.16	13.73	15.35	15.87	14.29	14.55	14.70	14.26	8.17	9.00
PRCP	1950	52.26	45.00	49.03	39.33	32.26	146.00	80.00	125.81	80.67	97.42	13.33	12.26
TMIN	1950	18.90	19.96	25.74	26.57	29.58	26.37	26.61	26.29	25.73	21.81	18.83	18.13
TMAX	1950	9.39	10.50	12.76	13.30	15.94	14.70	14.26	13.90	14.60	12.77	9.60	7.74
PRCP	1951	14.84	2.86	8.39	2.67	68.39	98.00	131.61	70.97	60.00	47.61	36.00	14.84
TMIN	1951	19.13	20.96	25.03	27.77	28.19	28.27	25.94	27.87	26.43	24.03	22.60	26.55
TMAX	1951	9.03	8.14	11.06	13.57	15.32	15.17	14.29	15.03	15.33	13.39	12.63	13.39
PRCP	1952	18.71	8.28	28.39	84.14	111.61	284.67	168.00	133.55	158.00	25.16	70.00	3.87
TMIN	1952	23.77	21.93	25.48	22.97	27.77	25.87	27.58	29.97	27.27	27.42	27.60	26.81
TMAX	1952	12.39	10.14	10.71	10.23	11.26	10.50	10.52	11.19	10.27	9.61	9.43	9.23
PRCP	1953	12.90	25.71	19.35	54.67	18.06	141.33	151.61	72.26	115.17	86.67	52.00	23.23
TMIN	1953	25.52	28.07	30.90	31.23	30.84	28.27	28.45	29.71	28.87	26.84	26.77	26.94
TMAX	1953	7.52	9.46	11.00	11.10	10.65	10.00	9.94	10.26	9.63	8.87	8.40	7.71
PRCP	1954	14.19	28.57	16.77	24.00	43.87	188.00	67.10	73.55	126.00	158.06	106.67	23.87
TMIN	1954	27.23	26.79	28.61	27.73	28.52	27.20	27.68	28.48	27.37	25.55	24.37	23.00
TMAX	1954	7.90	8.04	9.16	9.90	10.32	8.93	8.55	10.00	8.20	7.87	10.47	8.97
PRCP	1955	23.50	17.68	14.50	64.00	59.03	239.60	745.84	440.32	486.40	237.58	110.70	86.61
TMIN	1955	22.58	24.54	26.00	29.33	29.52	27.82	24.31	27.16	25.76	24.66	24.83	23.16
TMAX	1955	10.23	10.11	11.81	15.73	16.32	15.99	15.88	15.57	16.19	14.75	13.31	10.80

**Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945
– 2018, continua**

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	1956	37.60	16.37	15.60	68.03	228.68	478.50	301.43	180.87	213.08	41.23	65.33	53.93
TMIN	1956	22.46	24.74	25.42	27.22	26.10	25.07	25.56	26.45	25.48	25.91	22.03	21.59
TMAX	1956	9.62	11.57	12.62	15.17	15.05	15.48	14.39	15.03	15.22	14.11	12.21	11.42
PRCP	1957	28.16	116.25	44.52	96.50	173.23	209.00	236.52	226.55	329.10	96.77	29.50	27.48
TMIN	1957	23.49	24.83	29.86	36.65	28.32	29.08	26.38	27.34	26.39	24.73	23.94	21.75
TMAX	1957	10.75	12.02	12.78	15.57	16.24	17.14	15.25	15.31	15.84	13.45	13.51	9.69
PRCP	1958	44.03	54.11	83.23	113.93	173.00	327.50	306.29	260.13	211.00	244.97	52.80	30.48
TMIN	1958	19.50	21.45	23.66	28.08	26.75	27.57	25.66	28.07	26.81	25.20	23.49	19.88
TMAX	1958	9.06	10.68	12.94	16.01	16.21	17.17	16.02	15.89	16.16	15.97	14.16	12.08
PRCP	1959	44.03	54.11	83.23	113.93	173.00	327.50	306.29	260.13	211.00	144.97	52.80	30.48
TMIN	1959	20.35	24.38	23.19	25.04	27.39	26.59	26.61	27.29	27.72	25.57	22.24	20.50
TMAX	1959	11.14	12.54	12.10	13.38	15.62	16.65	15.21	15.15	15.48	15.78	12.06	9.83
PRCP	1960	35.61	20.69	51.97	29.00	134.52	359.60	411.48	259.45	334.10	200.61	58.30	65.81
TMIN	1960	22.33	22.34	24.29	27.34	28.17	28.04	26.01	26.69	25.25	26.10	23.90	19.77
TMAX	1960	10.60	9.17	11.81	13.62	16.43	16.18	15.42	16.40	15.84	15.96	13.40	10.41
PRCP	1961	122.32	43.39	19.84	13.50	40.65	438.00	396.61	129.00	313.50	68.71	163.00	66.00
TMIN	1961	18.30	21.77	26.98	26.94	29.25	27.53	26.25	27.53	27.49	24.61	24.52	23.63
TMAX	1961	10.50	9.97	13.84	14.91	16.38	15.65	14.49	14.79	15.43	13.25	13.21	11.66
PRCP	1962	18.39	11.79	44.52	167.00	199.84	212.00	293.23	329.03	273.72	203.23	190.00	57.10
TMIN	1962	22.27	28.43	26.63	26.32	27.44	28.30	27.60	28.05	27.63	27.04	24.33	22.26
TMAX	1962	8.46	12.19	12.67	13.80	15.76	16.41	14.69	15.40	15.68	14.89	11.37	11.55
PRCP	1963	16.94	6.43	48.39	12.00	155.32	407.80	420.48	237.29	241.50	277.65	92.00	74.03
TMIN	1963	23.38	22.81	26.55	29.33	27.25	28.02	26.85	27.47	26.32	24.07	23.43	19.31
TMAX	1963	10.79	9.08	13.58	15.26	15.72	16.33	15.47	15.84	15.77	14.38	12.13	10.19
PRCP	1964	30.58	19.66	36.77	11.50	189.68	423.50	255.48	126.29	283.00	204.68	112.50	56.13
TMIN	1964	19.98	21.56	26.55	30.85	28.76	26.49	26.93	28.10	26.92	23.44	24.34	22.61
TMAX	1964	9.79	10.93	13.54	16.17	16.99	16.00	15.44	15.80	15.94	13.35	13.26	11.46
PRCP	1965	79.84	95.89	111.29	81.80	72.58	356.50	300.48	271.45	243.00	102.26	103.00	109.35
TMIN	1965	21.77	22.88	24.50	28.49	28.26	27.41	27.08	26.63	27.23	24.40	25.33	21.13
TMAX	1965	10.30	10.93	12.28	14.89	16.51	16.65	14.80	15.64	15.54	14.79	12.87	11.86
PRCP	1966	57.10	103.39	90.00	72.50	106.61	331.50	340.16	249.68	336.00	87.10	21.50	27.10
TMIN	1966	18.77	21.81	22.77	27.62	26.68	26.90	27.09	27.12	26.80	24.01	22.15	20.46
TMAX	1966	9.95	10.29	11.49	15.38	15.75	16.33	16.06	15.82	15.78	15.14	10.33	9.25
PRCP	1967	29.52	68.57	35.81	104.50	84.10	352.50	197.42	298.06	509.00	144.19	112.00	19.84
TMIN	1967	21.12	21.40	25.55	27.92	28.93	27.27	26.31	26.45	24.80	22.75	23.22	21.66
TMAX	1967	8.99	8.58	11.95	14.44	15.89	15.88	14.85	15.58	15.15	13.72	12.15	11.23
PRCP	1968	39.68	101.79	31.94	101.50	135.97	255.50	370.00	387.87	233.50	154.35	195.00	95.81
TMIN	1968	21.27	20.26	22.62	28.41	28.54	27.77	26.50	26.31	26.11	25.44	23.16	20.84
TMAX	1968	10.12	9.52	10.13	15.20	16.50	16.95	15.19	15.03	16.30	15.11	12.93	11.36

**Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945
– 2018, continua**

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	1969	116.13	92.14	88.06	105.60	85.16	239.50	306.45	342.74	383.50	111.29	44.00	32.42
TMIN	1969	22.03	23.65	20.42	27.63	27.98	28.56	28.01	26.14	25.03	26.25	23.41	22.56
TMAX	1969	10.29	11.92	12.11	15.16	16.48	17.68	16.36	16.67	15.76	15.25	12.33	11.06
PRCP	1970	38.71	173.57	32.26	14.67	100.65	319.33	352.26	370.32	370.00	81.94	65.33	12.90
TMIN	1970	21.56	20.90	24.15	30.55	27.32	27.13	25.24	26.53	25.63	25.42	22.30	25.16
TMAX	1970	10.05	9.91	11.95	16.03	15.21	16.40	15.15	16.08	15.80	15.26	9.26	10.60
PRCP	1971	27.74	31.43	67.74	69.33	119.35	230.00	298.71	318.71	333.33	285.81	100.00	48.39
TMIN	1971	24.31	25.70	26.81	28.38	29.44	28.19	26.52	26.66	27.11	25.36	24.88	24.77
TMAX	1971	9.82	10.32	12.49	14.05	16.73	16.20	14.77	14.82	16.08	15.00	12.97	11.77
PRCP	1972	95.81	24.83	86.13	86.00	116.45	381.00	355.00	235.65	263.00	109.35	181.00	21.29
TMIN	1972	23.71	23.65	28.01	28.67	26.74	26.62	24.49	25.69	27.24	27.21	25.33	23.45
TMAX	1972	10.87	10.16	13.65	16.05	16.63	16.40	15.77	14.95	15.63	15.66	14.50	10.69
PRCP	1973	24.19	44.46	9.19	73.00	103.55	360.00	250.16	284.03	301.50	101.61	40.00	30.97
TMIN	1973	21.50	19.61	29.19	27.28	29.40	27.10	26.45	26.27	27.97	25.79	26.03	21.94
TMAX	1973	9.60	10.54	14.94	15.75	17.44	17.17	16.23	15.55	16.25	15.39	13.42	10.26
PRCP	1974	69.19	54.64	100.16	23.00	179.03	380.50	213.87	240.48	225.50	43.55	68.50	34.84
TMIN	1974	24.35	22.45	27.60	27.73	29.08	25.93	25.26	28.03	26.07	23.35	23.04	22.65
TMAX	1974	11.69	10.79	12.77	15.33	15.82	15.88	14.16	14.94	15.48	13.31	12.10	11.32
PRCP	1975	77.42	51.43	6.77	0.00	154.35	438.50	157.74	127.74	362.50	193.55	49.00	38.71
TMIN	1975	22.57	25.57	28.60	31.10	29.74	28.76	26.95	28.52	26.92	26.42	26.28	22.68
TMAX	1975	10.89	12.84	15.74	16.58	16.92	16.62	16.29	16.02	15.60	14.19	12.66	11.48
PRCP	1976	33.87	23.79	19.35	88.00	115.16	375.00	305.16	220.65	221.00	250.65	43.00	51.29
TMIN	1976	22.16	24.93	29.06	27.70	28.13	27.63	27.13	27.97	28.80	24.94	20.34	21.68
TMAX	1976	9.42	9.10	13.58	14.03	15.68	15.97	15.13	15.42	15.77	14.13	11.67	10.35
PRCP	1977	27.10	67.50	28.06	92.00	109.84	321.50	246.29	248.23	176.00	394.35	29.50	37.26
TMIN	1977	22.00	20.97	28.68	25.40	29.48	27.32	27.58	28.69	28.68	26.56	23.72	23.54
TMAX	1977	9.87	9.96	13.04	12.93	17.26	18.85	17.65	16.39	16.88	16.35	14.68	12.79
PRCP	1978	38.71	43.93	109.35	35.50	46.94	316.50	218.23	324.68	546.00	207.10	53.00	45.48
TMIN	1978	22.89	22.43	25.57	28.92	32.32	28.93	28.55	29.24	28.13	24.84	25.50	24.83
TMAX	1978	10.55	9.96	12.03	14.08	16.50	15.27	14.24	14.48	15.87	13.45	13.33	11.50
PRCP	1979	28.06	32.14	30.00	272.00	133.55	256.00	319.55	433.55	368.60	8.71	62.00	51.29
TMIN	1979	23.26	22.86	24.29	28.85	26.96	26.98	28.48	25.59	24.61	27.93	21.91	21.25
TMAX	1979	9.97	9.41	11.46	14.92	14.33	14.27	14.55	14.66	13.74	12.80	11.23	10.08
PRCP	1980	62.90	40.34	16.45	86.00	92.90	383.00	383.23	317.61	395.00	65.81	98.70	31.65
TMIN	1980	22.91	23.32	29.44	27.27	30.86	27.12	27.38	26.97	26.05	26.20	21.42	20.43
TMAX	1980	9.71	9.97	12.37	12.75	15.96	14.86	14.13	14.56	14.71	12.84	10.18	9.41

**Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945
– 2018, continua**

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	1981	110.32	78.75	55.16	59.00	113.23	366.00	312.74	298.94	370.00	87.10	22.60	42.58
TMIN	1981	18.90	21.53	24.89	27.55	29.81	26.17	26.77	27.48	26.73	27.84	26.70	24.01
TMAX	1981	8.91	9.85	10.82	13.49	15.32	14.63	14.75	14.02	14.12	14.12	10.42	10.49
PRCP	1982	0.00	41.79	3.87	63.00	155.23	363.00	366.77	213.87	274.10	149.52	25.00	52.26
TMIN	1982	25.66	25.21	28.01	30.47	27.23	28.70	28.03	28.10	27.60	24.94	25.14	23.14
TMAX	1982	9.87	10.07	12.20	13.65	14.22	14.61	13.68	13.20	13.49	12.76	10.53	9.16
PRCP	1983	41.61	50.36	25.16	26.00	20.32	257.10	714.19	224.52	372.00	127.74	26.00	37.74
TMIN	1983	21.46	23.07	27.00	26.81	29.90	28.43	27.23	27.84	27.27	25.43	25.30	24.26
TMAX	1983	8.46	9.26	10.60	12.00	15.05	14.21	14.33	14.47	14.46	11.71	11.67	10.01
PRCP	1984	57.10	28.97	6.77	32.00	166.45	214.00	337.10	309.68	352.00	66.77	28.00	52.26
TMIN	1984	19.43	21.64	26.52	30.50	29.39	26.87	26.13	26.52	24.67	27.58	27.10	25.00
TMAX	1984	8.99	8.74	10.77	13.48	13.58	13.48	13.98	13.81	14.42	13.68	10.13	9.95
PRCP	1985	25.16	32.14	30.00	118.00	108.19	319.00	299.03	146.71	280.00	295.16	28.00	61.94
TMIN	1985	23.10	22.75	26.15	26.60	28.26	27.80	26.84	27.65	28.07	27.32	27.10	23.06
TMAX	1985	8.01	8.32	10.50	12.13	14.33	14.43	13.54	14.03	11.77	12.45	10.84	9.38
PRCP	1986	3.87	22.50	64.35	90.00	216.77	351.00	306.77	308.71	294.00	129.68	123.00	47.62
TMIN	1986	24.71	28.15	25.06	29.97	27.55	27.53	27.13	28.06	27.23	25.97	26.07	22.33
TMAX	1986	6.90	9.62	8.93	13.81	14.53	14.90	13.84	14.12	13.17	12.42	11.19	10.74
PRCP	1987	39.68	48.21	66.77	49.00	16.94	396.00	396.77	326.13	381.00	96.77	70.00	35.81
TMIN	1987	22.58	24.18	23.87	24.13	28.71	27.53	25.74	27.94	28.83	26.45	25.43	24.81
TMAX	1987	6.13	8.76	10.57	11.15	13.92	14.99	14.32	13.70	14.31	10.71	9.53	10.99
PRCP	1988	77.42	45.52	97.74	92.00	103.55	171.00	264.19	324.48	386.00	163.55	22.00	45.48
TMIN	1988	21.61	23.59	24.74	29.33	27.45	26.97	27.74	26.13	27.13	25.10	29.03	24.84
TMAX	1988	7.97	9.61	10.20	13.99	14.07	14.96	14.52	14.94	14.30	12.29	11.37	9.07
PRCP	1989	21.29	66.43	3.87	100.00	215.81	210.00	298.06	473.23	337.00	95.81	97.00	76.45
TMIN	1989	27.39	26.54	27.23	28.47	29.84	28.87	27.94	28.00	26.60	27.94	27.90	21.68
TMAX	1989	10.29	9.43	9.88	12.36	15.15	14.99	14.33	14.02	14.95	12.27	11.06	8.40
PRCP	1990	27.10	73.93	55.16	191.00	17.42	362.00	387.74	256.45	247.00	118.06	71.00	6.77
TMIN	1990	25.42	26.71	25.10	27.23	29.94	27.27	26.39	27.65	27.83	25.71	26.47	24.16
TMAX	1990	9.86	10.40	10.72	13.68	15.25	14.95	14.47	14.15	14.97	13.56	12.52	12.43
PRCP	1991	60.00	49.29	9.68	67.00	199.35	319.00	324.19	256.45	297.00	132.90	84.00	57.10
TMIN	1991	24.48	22.79	30.45	30.73	29.19	27.43	27.13	27.90	26.23	26.03	24.20	23.81
TMAX	1991	11.16	9.64	12.76	14.67	15.53	15.98	14.49	14.50	14.62	12.74	10.50	10.52
PRCP	1992	143.71	22.50	71.85	94.50	245.32	140.25	310.65	244.60	270.75	68.95	123.75	8.71
TMIN	1992	20.68	21.69	26.03	26.37	26.10	29.27	27.19	27.52	26.47	27.16	24.20	26.10
TMAX	1992	9.24	9.15	12.42	13.66	13.38	15.04	14.93	14.79	13.80	12.91	11.05	9.89
PRCP	1993	45.48	47.14	55.16	65.00	106.45	484.00	350.32	306.77	349.00	121.94	27.00	54.19
TMIN	1993	25.74	26.29	26.61	28.30	27.97	27.53	27.48	27.87	27.37	28.19	26.27	25.06
TMAX	1993	9.71	10.18	10.38	13.50	14.63	14.97	14.01	14.15	14.28	13.54	10.36	9.35

**Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945
– 2018, continua**

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	1994	141.29	42.86	56.13	124.00	149.03	181.00	98.71	390.97	222.00	135.48	73.00	60.97
TMIN	1994	23.55	24.43	27.16	28.33	29.03	29.17	29.55	28.03	27.03	27.74	28.33	23.61
TMAX	1994	8.25	9.80	11.29	13.05	14.35	14.79	14.30	13.86	14.11	13.87	11.87	10.53
PRCP	1995	42.58	16.07	63.87	46.00	174.19	256.00	272.90	433.87	197.00	201.29	71.00	60.97
TMIN	1995	23.10	26.43	25.68	28.43	31.13	27.73	27.23	27.32	26.93	26.84	26.33	23.06
TMAX	1995	9.81	9.67	11.64	14.17	15.24	14.83	14.94	14.99	14.78	12.76	11.55	10.02
PRCP	1996	9.68	39.31	54.19	113.00	227.42	344.00	235.16	233.23	135.00	248.71	56.00	15.48
TMIN	1996	24.32	24.93	24.40	28.50	28.97	27.80	27.68	26.42	29.17	26.77	24.33	23.45
TMAX	1996	8.04	8.94	9.70	12.33	14.21	14.92	14.31	14.59	14.93	11.82	11.14	9.75
PRCP	1997	25.16	85.71	60.97	79.00	191.61	240.00	259.35	249.35	193.00	289.35	63.00	57.10
TMIN	1997	22.45	23.79	25.74	26.13	26.65	28.10	26.74	28.03	25.93	25.65	25.03	21.45
TMAX	1997	9.72	10.01	10.99	13.30	14.00	14.81	13.68	14.90	14.12	12.87	12.99	8.93
PRCP	1998	34.84	2.14	60.97	39.00	0.97	157.00	538.06	418.71	485.00	328.06	150.00	21.29
TMIN	1998	24.03	27.00	25.55	28.27	32.45	30.93	27.35	28.29	26.37	25.19	25.67	22.77
TMAX	1998	9.84	9.64	11.60	13.51	14.44	15.54	14.79	14.93	14.94	13.99	12.19	9.91
PRCP	1999	13.55	3.21	17.42	81.00	89.03	259.00	649.35	495.16	464.00	167.42	83.00	43.55
TMIN	1999	24.35	25.57	28.00	30.13	30.35	27.17	25.29	27.55	25.20	24.68	22.47	21.06
TMAX	1999	9.53	10.03	12.40	13.82	15.00	14.60	12.61	14.76	13.95	12.21	9.34	9.33
PRCP	2000	83.71	72.93	107.90	117.00	75.00	66.00	168.87	511.45	297.00	210.48	99.00	113.71
TMIN	2000	20.90	26.07	28.97	27.63	27.84	27.10	27.45	25.94	27.10	25.65	24.90	20.52
TMAX	2000	9.58	10.28	12.88	13.97	14.47	14.28	14.46	13.52	13.97	12.26	12.51	9.25
PRCP	2001	50.47	41.30	46.74	81.32	132.35	341.39	347.43	301.05	345.24	166.73	67.94	42.80
TMIN	2001	22.52	23.51	26.28	27.64	28.56	27.34	26.62	27.00	26.58	25.77	24.72	23.21
TMAX	2001	9.42	9.82	11.78	13.74	15.13	15.25	14.57	14.58	14.65	13.27	11.65	10.24
PRCP	2002	48.91	42.48	45.24	82.17	127.47	345.84	344.52	305.44	351.36	167.06	63.80	43.81
TMIN	2002	22.50	23.68	26.19	27.70	28.50	27.35	26.77	27.07	26.47	25.66	24.61	22.68
TMAX	2002	9.36	9.79	11.69	13.65	15.02	15.17	14.52	14.55	14.57	13.13	11.51	10.17
PRCP	2003	49.76	42.41	46.49	82.48	128.30	338.46	347.78	306.18	353.08	169.32	64.62	44.26
TMIN	2003	22.54	23.77	26.10	27.61	28.53	27.42	26.76	27.15	26.54	25.85	24.60	22.61
TMAX	2003	9.35	9.76	11.58	13.58	14.94	15.11	14.47	14.52	14.51	13.05	11.44	10.17
PRCP	2004	37.01	37.32	58.68	110.18	111.21	261.33	260.85	360.89	360.88	159.79	158.58	57.63
TMIN	2004	19.74	21.50	23.07	25.89	26.12	25.25	24.68	25.13	24.46	23.42	21.14	20.73
TMAX	2004	10.64	11.29	12.75	14.82	16.18	16.03	15.58	15.82	16.09	14.45	12.61	11.46
PRCP	2005	47.11	44.39	54.93	78.12	124.56	298.92	174.18	202.85	288.95	114.85	64.24	37.00
TMIN	2005	19.57	21.57	23.12	25.74	26.00	25.26	24.74	25.11	24.49	23.38	21.15	20.73
TMAX	2005	10.59	11.36	12.86	14.77	16.12	16.05	15.54	15.75	16.06	14.51	12.67	11.44
PRCP	2006	37.16	22.61	21.29	42.30	238.45	365.40	175.45	137.23	223.00	107.42	63.90	53.03
TMIN	2006	21.45	22.05	25.27	27.85	27.24	24.72	23.98	26.05	26.82	25.84	22.10	20.13
TMAX	2006	10.73	11.05	13.76	15.32	16.23	15.13	16.00	17.23	17.13	15.85	13.25	11.76

Base de datos meteorológica de Huatusco, Veracruz, México. Periodo 1945 – 2018, finaliza

Parámetro	Año	Mes del año											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRCP	2007	37.94	111.54	24.48	42.40	57.00	187.40	167.23	185.42	202.80	82.26	85.20	18.48
TMIN	2007	19.91	22.52	23.75	25.65	25.82	27.12	26.39	25.24	24.83	23.71	21.85	23.05
TMAX	2007	12.34	11.93	13.42	14.82	15.84	16.38	16.13	16.13	15.65	14.18	12.83	12.69
PRCP	2008	25.55	38.79	25.94	66.30	160.74	428.50	296.61	42.68	213.50	160.26	41.90	33.77
TMIN	2008	20.73	24.36	24.73	26.62	28.81	24.90	24.87	26.32	24.38	22.39	21.30	21.75
TMAX	2008	11.08	12.60	12.98	15.85	17.11	15.98	15.74	16.87	17.17	14.31	11.98	10.95
PRCP	2009	33.77	34.18	6.68	97.00	129.58	343.90	164.03	120.68	458.60	237.29	18.70	67.45
TMIN	2009	20.44	21.48	22.58	26.32	25.37	25.42	25.11	24.76	24.07	24.10	20.57	20.03
TMAX	2009	10.40	10.86	12.00	14.92	16.29	16.28	15.56	15.18	16.27	15.79	12.60	11.66
PRCP	2010	156.00	111.86	45.94	171.60	92.13	49.87	411.61	206.19	430.80	73.55	33.33	18.58
TMIN	2010	17.32	17.96	21.00	24.28	26.79	26.57	24.37	24.58	23.97	22.45	21.50	19.03
TMAX	2010	10.03	10.07	11.03	14.63	16.55	16.87	16.68	16.45	16.22	12.00	11.50	8.42
PRCP	2011	52.65	39.57	12.39	39.33	114.45	482.80	417.81	271.74	336.27	80.90	53.47	32.90
TMIN	2011	20.34	21.56	24.15	28.13	27.58	25.17	24.10	25.32	24.57	21.94	21.43	19.42
TMAX	2011	10.87	10.87	12.84	15.30	16.65	15.68	15.90	15.52	15.07	12.68	12.13	10.29
PRCP	2012	87.74	60.41	72.90	141.07	180.65	440.93	180.00	458.71	511.20	274.84	165.73	22.58
TMIN	2012	19.97	21.34	23.26	24.47	25.31	25.10	23.89	24.73	24.30	22.97	19.55	21.44
TMAX	2012	10.95	12.43	12.77	13.53	15.21	16.27	15.26	15.68	15.62	13.87	11.26	11.56
PRCP	2013	62.32	108.29	107.87	59.87	145.42	464.40	188.90	347.23	658.93	210.19	162.40	41.03
TMIN	2013	19.06	22.86	21.07	25.77	25.19	25.27	24.37	24.08	24.03	23.84	20.47	20.60
TMAX	2013	11.23	12.04	11.25	14.70	15.52	15.42	14.60	14.76	16.38	15.63	13.22	11.97
PRCP	2014	30.58	33.29	65.03	38.13	344.26	569.33	218.45	242.97	670.40	99.10	95.87	75.87
TMIN	2014	19.43	22.21	23.88	26.29	23.45	24.98	24.52	25.26	23.93	23.32	19.25	19.45
TMAX	2014	8.72	11.64	13.10	14.14	14.98	16.40	14.98	15.02	15.92	14.77	12.50	10.98
PRCP	2015	75.23	52.57	231.61	199.73	128.65	286.27	144.65	137.94	338.40	116.90	210.27	14.06
TMIN	2015	18.05	18.82	20.94	25.37	24.81	23.58	24.95	25.65	24.17	24.71	22.33	22.08
TMAX	2015	10.27	10.16	12.92	14.90	15.66	15.62	15.29	15.48	15.65	15.31	14.85	13.13
PRCP	2016	112.77	48.55	95.10	151.20	142.45	252.93	206.06	392.90	182.00	192.13	107.33	84.77
TMIN	2016	18.90	18.78	23.71	25.07	26.78	25.17	25.29	24.61	24.40	22.97	21.53	21.97
TMAX	2016	10.24	9.72	13.76	14.95	17.08	15.68	15.53	15.60	15.70	14.05	13.27	13.68
PRCP	2017	16.13	13.86	85.68	116.53	195.61	355.20	128.77	214.97	569.87	77.81	28.80	34.06
TMIN	2017	21.48	23.93	22.52	25.07	26.35	25.03	24.24	25.03	23.97	22.87	21.73	19.80
TMAX	2017	10.94	12.09	13.05	14.88	17.08	16.57	15.27	15.95	16.28	14.87	11.82	10.38
PRCP	2018	51.18	29.00	152.95	123.51	40.19	364.62	60.37	344.58	287.78	212.71	89.44	101.61
TMIN	2018	17.29	22.54	23.71	23.70	24.48	25.37	25.52	24.84	24.97	22.84	21.27	20.74
TMAX	2018	9.84	12.25	14.32	14.10	15.31	16.32	15.11	14.95	15.68	15.32	13.47	11.23

ANEXO 2. Base de datos de las determinaciones de respiración del suelo, macrofauna, M.O, C y N en el suelo y en biomasa vegetal; continua.

Sistema	Respiración 10	Respiración 20	Respiración 30	Macrofauna 10	Macrofauna 20	Macrofauna 30	Macrofauna TOTAL	MO 10	MO 20	MO 30
SCR	183.86	165.17	163.08	0.93	0.33	0.04	1.3	6.02	3.99	3.4
SCR	182.87	186.56	170.77	0.64	0.29	0.04	0.97	5.45	3.24	2.8
SCR	170.56	187.87	179.66	1.07	0.28	0.06	1.41	5.01	3.19	2.9
SCP	240.22	206.28	193.04	1.35	0.13	0.01	1.49	6.85	6.19	3.9
SCP	236.27	180.72	209.69	1.5	0.1	0.02	1.62	6.49	4.38	3.8
SCP	211.97	226.93	202.96	1.53	0.2	0.02	1.76	4.71	3.79	2.3
SCA	204.22	198.21	178.49	0.01	0	0	0.01	13.03	10.8	9.5
SCA	174.52	178.91	166.2	0.02	0	0	0.02	12.83	11.2	10
SCA	200.68	170.27	171.27	0.02	0	0	0.02	13.14	11	10
SMA	220.94	172.21	185.34	0.01	0	0	0.01	8.76	7.05	5.5
SMA	216.8	180.48	188.41	0.01	0	0	0.01	9.32	8.08	5.2
SMA	197.58	195.72	183.58	0.01	0	0	0.01	10.63	8.42	5.6

Respiración del suelo: Kg CO₂ ha⁻¹; Macrofauna del suelo: Kg MS ha⁻¹; MO: Materia orgánica en %; Cada valor representa el promedio de tres repeticiones.

Base de datos de las determinaciones de respiración del suelo, macrofauna, M.O, C y N en el suelo y en biomasa vegetal; finaliza.

Sistema	C árboles	C arbustos	C Raíces	CBV	C-CapaL	C-CapaF	C-10	C-20	C-30	COS	C-He
SCR	0.62	34.44	6.97	42.03	0.33	0.83	29.98	17.96	15.94	63.88	0.642
SCR	0.87	34.4	6.97	42.24	0.14	0.61	26.36	15.83	13.2	55.39	0.4919
SCR	0.94	27.84	6.07	34.85	0.1	0.26	26.68	16.8	16.05	59.54	1.0567
SCP	1.21	14.05	3.54	18.8	0.35	1.41	30.44	27.03	18.76	76.23	1.872
SCP	2.32	8.75	2.84	13.91	0.4	1.07	33.26	24.28	20.31	77.85	1.67
SCP	3.49	9.1	3.07	15.66	0.41	0.88	24.48	22.93	11.53	58.94	1.6567
SCA	11.21	20.72	6.32	38.25	0.24	0	57.48	50.93	39.55	147.96	0.94
SCA	11.22	15.46	5.05	31.73	0.29	0	45.72	48.25	51.9	145.87	0.93
SCA	11.43	21.68	4.68	37.79	0.25	0	48.27	42.4	32.14	122.81	0.92
SMA	36.48	0	7.17	43.65	0.18	0	30.86	21.33	17.11	69.3	0.93
SMA	25.4	0	5.2	30.6	0.17	0	28.52	22.58	18.89	70	0.97
SMA	30.29	0	6.04	36.33	0.17	0	36.58	27.87	19.28	83.73	0.96

Las unidades de carbono se expresan en Mg C ha⁻¹; Cada valor representa el promedio de tres repeticiones.

Base de datos de las determinaciones de respiración del suelo, macrofauna, M.O, C y N en el suelo y en biomasa vegetal; finaliza.

Sistema	N Capa L	N Capa L	N Capa F	N-10	N-20	N-30	NTS	C/N Capa L	C/N Capa F	C/N 10	C/N 20	C/N 30	C/N
SCR	0.01	0.01321	0.04	2.24	1.88	1.13	5.25	24.98	23.04	13.58	9.41	14.77	12.19
SCR	0	0.00454	0.03	1.8	1.66	1.2	4.66	30.85	20.97	14.82	9.72	11.25	11.89
SCR	0	0.00408	0.01	2.05	1.96	0.91	4.92	24.52	18.89	13.59	8.74	18.16	12.47
SCP	0.01	0.01327	0.06	1.79	1.43	1	4.21	26.38	24.64	17.07	19.06	21.56	18.41
SCP	0.02	0.0153	0.04	2.67	2.5	1.55	6.71	26.14	24.21	12.83	9.96	13.43	11.87
SCP	0.02	0.01458	0.04	2.3	2.27	1.26	5.83	28.13	22.62	10.57	10.58	9.19	10.18
SCA	0.01	0.00952	0	4.67	4.73	3.88	13.28	25.21	0	12.31	10.77	10.19	11.14
SCA	0.01	0.01189	0	3.91	3.83	3.6	11.34	24.38	0	11.69	12.6	14.42	12.86
SCA	0.01	0.00995	0	4.7	3.35	2.49	10.54	25.12	0	10.27	12.66	12.91	11.65
SMA	0.01	0.0078	0	3.08	2.62	1.65	7.35	23.08	0	10.02	8.14	10.37	9.43
SMA	0.01	0.00804	0	2.86	2.86	2.52	8.24	21.15	0	9.97	7.89	7.5	8.49
SMA	0.01	0.00741	0	2.01	2.13	1.78	5.92	22.93	0	18.2	13.09	10.83	14.14

Las unidades de nitrógeno se expresan en Mg N ha⁻¹; Cada valor representa el promedio de tres repeticiones.