



Review [Revisión]

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

[IDENTIFYING RESEARCH AREAS ON CARBON AND NITROGEN DYNAMICS IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS IN MEXICO]

Diana Ayala-Montejo^{1*}, Alejandro Ismael Monterroso-Rivas²,
Julio Baca-Del Moral³, Esteban Escamilla-Prado⁴, Rufo Sánchez-Hernández⁵,
Joél Pérez-Nieto⁶, Indumathi Rajagopal¹, Julio César Alegre-Orihuela⁷
and Eduardo Valdés-Velarde⁸

¹Programa de postgrado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, México C.P. 56230. Email. diayalamontejo@gmail.com

²Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, México C.P. 56230.

³Centros Regionales. Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, México C.P. 56230.

⁴Centro Regional Universitario Oriente. Universidad Autónoma Chapingo Km 6 carretera Huatusco-Jalapa, Huatusco, Veracruz, México C.P. 94100.

⁵División académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Km 25 Carretera Villahermosa-Teapa, Ranchería La Huasteca, Villahermosa, Tabasco, México C.P. 86040.

⁶Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, México C.P. 56230.

⁷Departamento de suelos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Avenida La Molina s/n, Lima, Perú C.P. 15024.

⁸Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, México C.P. 56230.

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Current research advances related to carbon and nitrogen dynamic and the environmental problems, that impact on the socioeconomic functions of agroforestry systems, and the importance of their floristic diversity, have not yet been analyzed in an integrated way for coffee agroforestry systems in Mexico. **Objective.** It consisted to identify the areas in need of research on carbon and nitrogen dynamic in coffee agroforestry systems in Mexico. **Methodology.** Publications were compiled until 2018, on the potential of agroforestry systems to keep carbon and nitrogen reserves, which influence in the carbon and nitrogen biogeochemical cycles, and greenhouse gas emissions, as well as socioeconomic importance, productive diversification, and the problems faced by small producers with their ability to adapt to climatic variations. This information was organized and subjected to a cluster analysis with the NVivo12 program, which allowed evaluating the frequency of research for each topic and the relationship between them. **Results.** 43% of publications are related to carbon storage and 13% on nitrogen dynamic in agroforestry systems, while 37 and 35% evidenced their environmental importance and ability to adapt to climatic variations, respectively. The socioeconomic characteristics show that there is a productive diversity, a floristic composition in multi-strata and traditional management, which affects on carbon and nitrogen dynamic, since the quality of organic matter depends on the diversity of the floristic composition of the system and the type of management applied by the producer. **Implications.** At present this analysis contributes to detect the advances of investigations on carbon and nitrogen dynamic to generate integrated research according to the Mexican national reality. **Conclusions.** Researchs should focus on: (1) the productive diversification and carbon and nitrogen dynamic; (2) effect of socioeconomic variations on carbon and nitrogen dynamic; (3) degree of sensitivity of carbon and

† Submitted July 3, 2020 – Accepted August 23, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

nitrogen dynamic to climatic variations; (4) identification of adaptive capacities, that allows carbon and nitrogen dynamic to be maintained.

Key words: Biogeochemical cycle. Greenhouse gas emissions. Climate change. Adaptive capacity. Productive diversification.

RESUMEN

Antecedentes. Los avances actuales de investigación relacionados con la dinámica del carbono y nitrógeno, los problemas ambientales que impactan en las funciones socioeconómicas de los sistemas agroforestales, y la importancia de su diversidad florística, aún no han sido analizados de manera integrada para sistemas agroforestales con café en México. **Objetivo.** Consistió en identificar las áreas con necesidad de investigación sobre la dinámica de carbono y nitrógeno en los sistemas agroforestales de café en México. **Metodología.** Se recopilaron publicaciones hasta el año 2018, sobre el potencial de los sistemas agroforestales para mantener las reservas de carbono y nitrógeno, que influyen en los ciclos biogeoquímicos de carbono y nitrógeno, emisiones de gases de efecto invernadero, la importancia socioeconómica, la diversificación productiva, y los problemas que enfrentan los pequeños productores, así como su capacidad de adaptación ante variaciones climáticas. Esta información fue organizada y se realizó un análisis de conglomerados con el programa NVivo12, que permitió evaluar la frecuencia de investigaciones para cada tema y la relación entre ellos. **Resultados.** El 43% de publicaciones está relacionada con almacenamiento de carbono y el 13% sobre la dinámica de nitrógeno en los sistemas agroforestales, 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. **Implicaciones.** El presente análisis contribuye a detectar los avances de investigación en la dinámica de carbono y nitrógeno para generar investigaciones integradas, y de acuerdo a la realidad nacional mexicana. **Conclusiones.** 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.

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, *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 *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 ha almacenado entre 100 y 170 Mg C ha⁻¹ (Espinoza *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 (*Hyphotenus 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 tasa o el cambio a monocultivos como el chayote (*Sechium edule*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), limón (*Citrus limón* (L.) Osbeck), aguacate (*Persea amaericana*), 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 *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.

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 por ciento 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.

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).

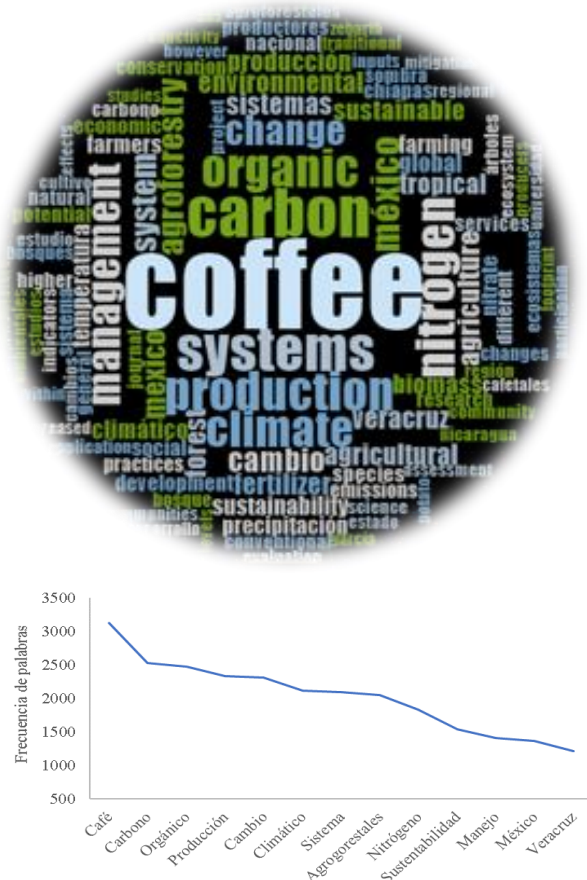


Figura 1. Distribución de las palabras más frecuentes en las publicaciones y documentos relacionados a las temáticas de estudio.

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).

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, social y la mitigación al cambio climático. El 43 % respecto al total estudiaron la dinámica de carbono en los SAF de café, el 37 % evidencian la importancia ambiental de los SAF, 35 % analizaron los efectos del cambio climático en los SAF mientras que los porcentajes más bajos están en los trabajos referidos a la dinámica de nitrógeno en los SAF de café (13%) y la importancia económica de los SAF (13%), tal como se muestra en la Figura 3.

La clasificación de las publicaciones por temáticas permitió comparar los avances de investigación entre la dinámica de carbono y la dinámica de nitrógeno en los SAF de café de México. Las publicaciones enfocadas en carbono fueron 22 (43%) y 7 (13%) en nitrógeno, de los cuales sólo existen dos trabajos que relacionan ambos temas tal como se muestra en la Figura 3. Esta relación permitió el análisis de la dinámica de carbono y nitrógeno y la importancia de los SAF en cinco enfoques de discusión: 1) los ciclos biogeoquímicos, 2) emisiones de gases de efecto invernadero, 3) potencial de los SAF de café y su relación con la dinámica de carbono y nitrógeno, 4) los factores socioeconómicos de los SAF de café, y 5) alcances y limitaciones de los SAF en México.

La dinámica de carbono y nitrógeno y los ciclos biogeoquímicos.

Existen cinco ciclos biogeoquímicos, el ciclo del fósforo, azufre, potasio, carbono y nitrógeno. El presente trabajo se centró en el ciclo del carbono y el ciclo del 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 *et al.* 2012).

Tabla 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 Cadena <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 Aguilar <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 ††
Figuerola, 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	Rosswall, 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
Haggar <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 ††	Valdes <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
Medina-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 ††

†††: Referencias seleccionadas, el 25 % del texto contiene tres o más palabras claves; 1: SAF y Carbono; 2: SAF y nitrógeno; 3: SAF diversidad – café; 4: SAF importancia ambiental; 5: SAF importancia económica; 6: SAF importancia social; 7: SAF mitigación CC; 8: SAF y CC.

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 *et al.* (2016), Katayama *et al.* (2009), Valdés *et al.* (2017), Paz Pellat *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.



Figura 2. Diagrama de análisis de conglomerados de los temas analizados.

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 CO_2 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).

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^{-1} y 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 (NH_4^+), producto inicial de la mineralización heterótrofa y después por la oxidación realizada por microorganismos autótrofos se transforma a nitrato (NO_3^-) a través del proceso conocido como nitrificación (Havlin *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 *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 *et al.* 2015).

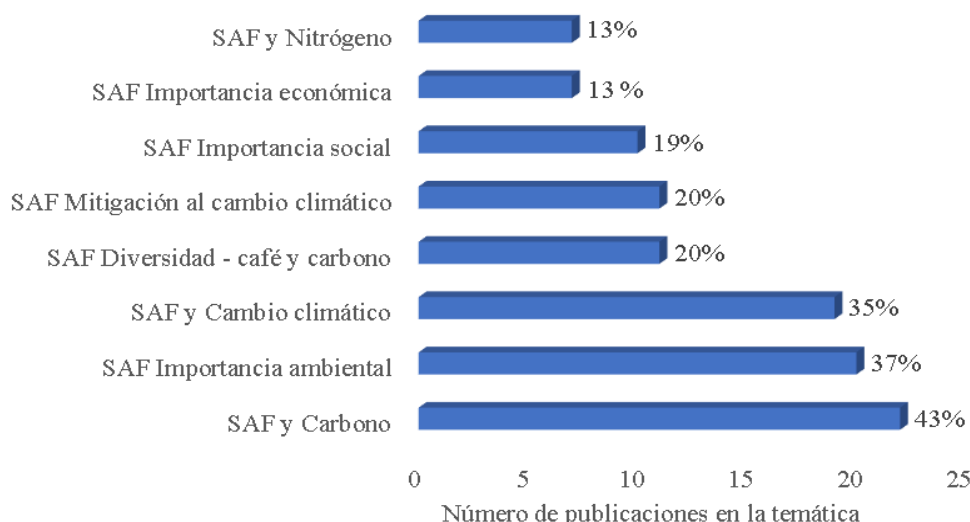


Figura 3. Porcentaje de publicaciones por temática en función de las 54 publicaciones seleccionadas.

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.

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.

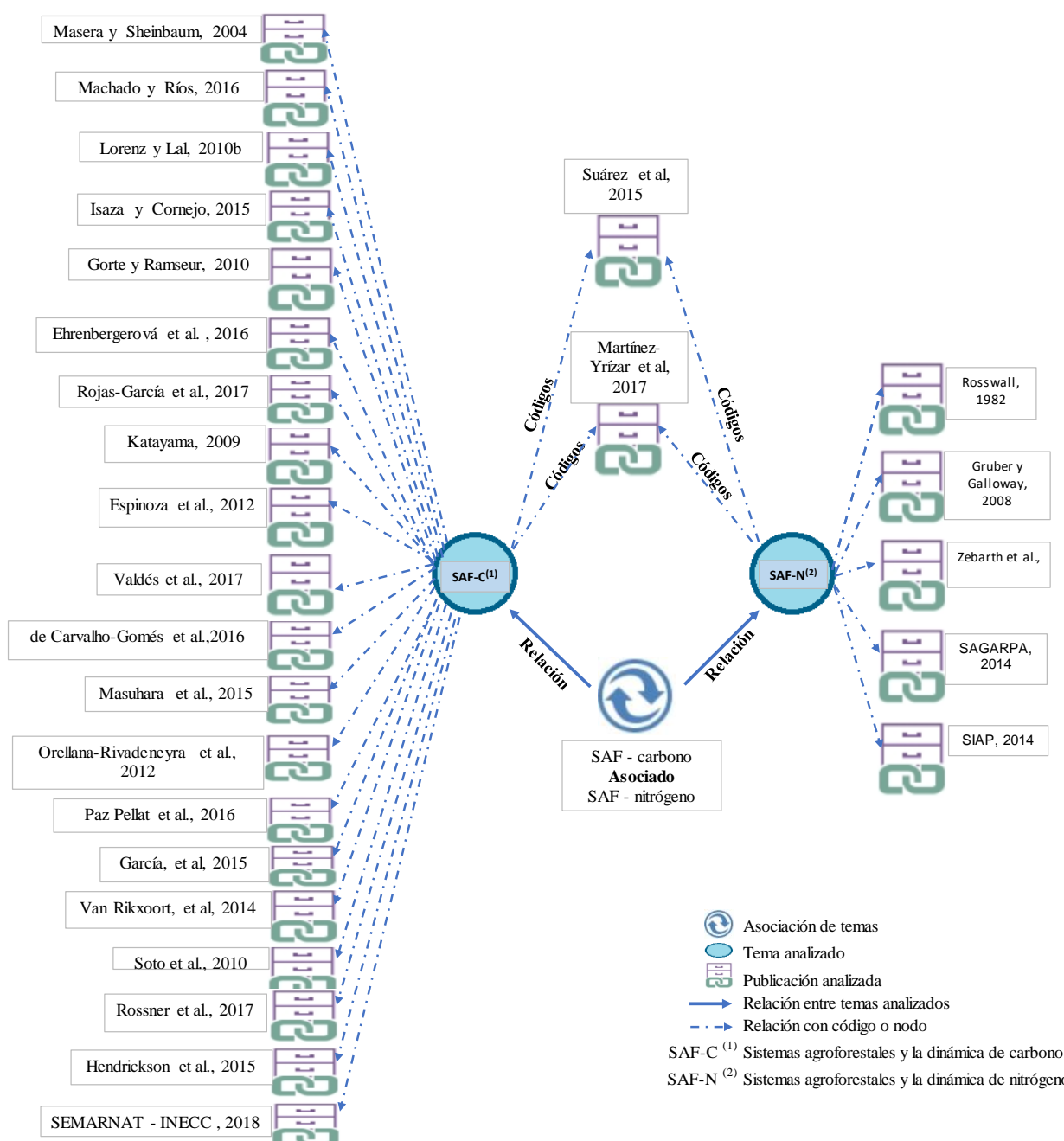


Figura 4. Análisis de relación en los temas: dinámica de carbono en sistemas agroforestales con café y dinámica de nitrógeno en sistemas agroforestales con café

El reporte del (IPCC, 2013) indica que al año 2011 la concentración de óxido nitroso N_2O 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 N_2O 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 maíz*), sorgo grano (*Sorgum bicolor*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), caña de azúcar, café y en trigo grano (*Triticum spp.*).

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 noveno puesto a nivel mundial entre 56 países, aportando el cuatro por ciento de la producción mundial de café, con tres millones de sacos. De la producción total, se exporta un 62%, equivalente a 900 millones de dólares (SAGARPA, 2017).

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 *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 *et al.* (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 *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 *et al.* (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.

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 *et al.*, 2011, Van Rikxoort *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 *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 *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. Está 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 *et al.*, 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.

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; estas limitantes permiten evidenciar, según Soto y Jiménez (2018), que se requiere de innovaciones que generen productos intermedios, rentabilidad y autoconsumo, estas 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 *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 *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 *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.

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

En México la implementación de nuevas innovaciones hasta el momento no presentan 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 *et al.* (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 del amarilla, lo que afecta a la reducción del 50% de la floración y la baja producción de grano (Villers *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.

CONCLUSIÓN

En la literatura científica, hay evidencia documental de que los SAF de café diversificados, 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 está 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.

Agradecimientos.

Se agradece al Programa de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Autónoma Chapingo. A los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

Financiamiento. Beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) otorgada al primer autor.

Conflicto de interés. Los autores declaran no tener conflicto de interés

Cumplimiento de normas éticas. Debido a la naturaleza del trabajo (revisión), los autores no tienen nada que declarar.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor por correspondencia (diayalamontejo@gmail.com), a solicitud razonable.

REFERENCIAS

- 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/aab5f
- 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
- 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, 60 P.
- Figueroa, 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.
- 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 cafecultura. *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 Latinoamericana*, 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. DOI: 10.1007/s11027-013-9467-x
- 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., González-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, 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 Atzacan, Ver. *Revistas Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), pp. 43-55. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2011.09.068
- Rossner, M. B., Kimminch, G., Eclesia, 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.; Tscharnkte, 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., Quatezani, 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