



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**CAMBIO DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS DURANTE LA TRANSICIÓN DE
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR A CAFÉ EN AMATLÁN**

DE LOS REYES, VERACRUZ

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

JUAN ANTONIO MENDOZA MONTIEL

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. FELIPE FRANCISCO GARCÍA OLIVA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., FEBRERO, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

ENTIDAD INSTITUTO DE GEOLOGÍA

OFICIO CPCB/102/2022

ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Subcomité de Biología Experimental y Biomedicina del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **21 de junio de 2021** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** del estudiante **MENDOZA MONTIEL JUAN ANTONIO** con número de cuenta **307225029** con la tesis titulada **“CAMBIO DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS DURANTE LA TRANSICIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR A CAFÉ EN AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ”**, realizada bajo la dirección del **DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DR. JORGE DIONISIO ETCHEVERS BARRA
Vocal: DRA. MARIANA BENÍTEZ KEINRAD
Vocal: DRA. YARENI PERRONI VENTURA
Vocal: DR. JOHN LARSEN
Secretario: DR. FELIPE FRANCISCO GARCÍA OLIVA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 21 de enero de 2022

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



Agradecimientos institucionales

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte del programa para continuar mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca con CVU No. 919797 para poder realizar mis estudios e investigación y al Programa de Apoyo a los Estudiantes de Posgrado (PAEP) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al proyecto PAPIIT-DGAPA-UNAM IN105819 “Evolución de la cubierta edáfica de los geosistemas kársticos en las regiones tropicales montañosas (Veracruz-Chiapas) en el contexto del cambio ambiental del Cuaternario e impacto antrópico” por el financiamiento para la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara, tutor principal del proyecto de investigación y al Comité Tutor conformado por la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo y el Dr. Felipe Francisco García Oliva. Agradezco cada valioso comentario y sugerencia que enriquecieron este proyecto de investigación de manera oportuna y objetiva.

Agradecimientos a título personal

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, por permitirme continuar con este eterno sendero del saber y brindarme todas las facilidades para concluir este grado académico. En deuda por siempre.

Al Instituto de Geología y al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) de la UNAM por otorgarme la facilidad del uso de sus instalaciones para realizar todas las actividades y procedimientos propios de un proyecto de Maestría.

Al Laboratorio de Biogeoquímica y Materia Orgánica del Suelo (BiogeoMOS) del Instituto de Geología y LANGEM de la UNAM por permitirme realizar el basto número de determinaciones del proyecto de Maestría en sus instalaciones.

Al Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos del Instituto de Investigaciones en Ecología y Sustentabilidad (IIES) de la UNAM campus Morelia por el apoyo con las determinaciones de Carbono orgánico total y Nitrógeno disponible (NH_4^+ y NO_3^-) y el acogimiento durante la estancia académica realizada en sus instalaciones.

Al Laboratorio de Paleosuelos del Instituto de Geología de la UNAM por la ayuda proporcionada para realizar el análisis textural del suelo.

Al Dr. Bruno M. Chávez Vergara, titular del BiogeoMOS. Por permitirme ser parte de su grupo de trabajo, por todas las enseñanzas y apoyo incondicionales que siempre me brindó de manera académica como personal. Todos los jalones de oreja sin duda fueron oportunos. Realmente es una de las mejores personas que he conocido en este pequeño recorrido llamado vida y que tengo el honor de llamar amigo. Gracias infinitas.

A mi comité tutor: Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo y Dr. Felipe F. García Oliva. Agradezco todos sus comentarios y observaciones siempre oportunos para beneficio del proyecto, además del apoyo brindado en todas las situaciones. Siempre me mostraron que, aunque el camino no es fácil, con dedicación y perseverancia se alcanzan las metas.

A la M. en C. Ofelia I. Beltrán Paz, técnico responsable del BiogeoMOS por la ayuda brindada y la asesoría para realizar los procedimientos para las determinaciones en el laboratorio para este trabajo. De verdad estoy enormemente agradecido por todas las enseñanzas que me aportaste dentro y fuera del laboratorio y por ser una gran persona siempre.

A la M. en C. Iris Suárez Quijada por su apoyo para realizar actividades dentro del invernadero del Instituto de Geología de la UNAM y la facilitación de material para el montaje de un experimento.

A la Dra. Yazmín Rivera Uria y al M. en C. Jaime Díaz Ortega por la ayuda en campo para la realización de perfiles de suelo y determinación sus rasgos macromorfológicos.

Al Sr. Ángel Reyes por permitir el acceso a las parcelas de cultivo en el municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz realizar el presente estudio.

A todo el equipo del BiogeoMOS con el que me tocó convivir y hacer muy ameno mi paso por el posgrado: Edith, Gis, Adri, Penélope, Chore, Toño, Marimar, Edwin. Gracias por los consejos que en su momento aportaron positivamente para enriquecer mi proyecto y por brindarme su amistad.

A Chore por mostrarme que la dedicación y el empeño, a pesar de no ser tareas fáciles, siempre rinden sus frutos. De verdad admiro tu vocación en este arduo camino de la ciencia y aún más la facilidad con la que compartes y demuestras el conocimiento adquirido. Y a Toño por hacerme ver que salirse del guion en la ciencia siempre es necesario y que las preguntas más fáciles siempre son las más difíciles. Tu determinación y hambre por crecer siempre me han parecido por demás admirables, además de la capacidad de síntesis de conocimiento que tienes. Ambos son de los mejores amigos que esta etapa de mi vida me dio.

A los compañeros y amigos del cubículo y de estudiantes y anexos Lalo, Jair, Eli, Chuchín, Jaz, David, Angelito, Naye por esas horas de trabajo arduo y ameno además de los buenos consejos, ayuda y buenas vibras que en todo momento me aportaron.

A Lalo y Jair, dos de las mejores personas que tengo el privilegio de llamar amigos y ellos me consideren del mismo modo, por esas horas de diversión y pláticas con y sin sentido que siempre hemos tenido y espero que no se detengan. Admiro su dedicación en el ámbito académico y que pronostico, seguirá creciendo exponencialmente. Gracias por su amistad y risas interminables.

A Sandrita por ser siempre buena consejera y amiga incondicional. Gracias por estos incontables años de amistad. Sigue creciendo.

A Iván por siempre animarme a continuar (a su modo) y a no darme por vencido. De las primeras y mejores personas que conocí en el mundo de la Biología y de quien no podría prescindir.

A Peter, Luis Jo y David por ser apoyo en todo momento, además de todas las vivencias e historias que tenemos juntos.

A mis papás, Maguitos y Daniel. Todo esto es absolutamente gracias a su apoyo incondicional durante estos años que, aunque no han sido del todo fáciles, siempre han estado para mí. Esto es dedicado a ustedes.

A mis hermanos Dan, Fer y Gabo. Aunque no somos perfectos entre nosotros, ustedes tres siempre han influido en mí y apoyado enormemente en todos aspectos.

Por último, pero no por eso menos importante. A ti, mi mayor apoyo y la mejor compañera de vida que nadie ha podido tener jamás. Agradezco profundamente todo tu apoyo, consejos, regaños, felicitaciones y demás que siempre me has dado. Es difícil expresar en tan pocas líneas todo lo que representas para mí, aunque todo lo que siento lo sabes y agradezco poder compartir todas esas risas, llantos, decepciones y un sinfín de emociones a tu lado y por ser una mujer admirable. Te amo infinitamente,

Ale.

Tabla de Contenido

Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción	4
1.1. PROPIEDADES EDÁFICAS	4
1.2. EFECTO DEL MANEJO AGRÍCOLA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO.....	6
1.3. PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS EN SISTEMAS AGRÍCOLAS	9
1.4. PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE CAFÉ Y CAÑA DE AZÚCAR	11
1.4.1. Manejo agrícola en los sistemas de producción de caña de azúcar y café	12
2. Justificación	15
2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	16
2.2. HIPÓTESIS	16
3. Objetivo General	16
3.1. OBJETIVOS PARTICULARES.....	16
4. Materiales y Métodos.....	17
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	17
4.2. TRABAJO DE CAMPO.....	20
4.2.1. Diseño de muestreo y colecta de muestras	20
4.2.2. Descripción de suelos.....	21
4.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO	22
4.3.1. Análisis físicos	22
4.3.1.1. Contenido de humedad	22
4.3.1.2. Densidad aparente.....	22
4.3.1.3. Textura	22
4.3.2. Análisis químicos	24
4.3.2.1. pH activo (1:10 p/V), pH potencial (1:10 p/V) y capacidad buffer	24
4.3.2.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Cationes intercambiables (CI) y porcentaje de Saturación de Bases (%SB)	24
4.3.2.3. Carbono Orgánico Total (COT).....	25
4.3.2.4. Nitrógeno total (Nt).....	25
4.3.2.5. Nitrógeno disponible (NH ₄ ⁺ y NO ₃ ⁻).....	25
4.3.2.6. Concentración de C y N en biomasa microbiana (Cmic y Nmic).....	25
4.3.2.7. Contenido de COT y Nt	26
4.3.2.8. Fraccionamiento por densidad y tamaño de partícula y cuantificación de C orgánico	27
4.3.2.9. Análisis de la materia orgánica particulada mediante espectroscopía infrarroja (ATR-FTIR).....	28
4.3.3. Análisis de actividad biológica	30
4.3.3.1. Mineralización potencial de carbono.....	30
4.3.3.2. Actividad enzimática.....	30
4.3.3.3. Actividad enzimática específica (AEE) y Coeficiente metabólico (qCO ₂).....	32
4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	32

5. Resultados	33
5.1. DESCRIPCIÓN DE SUELOS EN CAMPO.....	33
5.1.1. Sitio con producción de caña de azúcar (CA).....	33
5.1.2. Sitio con un cafetal recién establecido (CR)	33
5.1.3. Sitio con un cafetal maduro	34
5.2. ANÁLISIS FÍSICOS	37
5.2.1. Contenido de humedad, densidad aparente y textura	37
5.3. ANÁLISIS QUÍMICOS	39
5.3.1. pH y capacidad buffer	39
5.3.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Cationes intercambiables (CI) y % de Saturación de Bases (SB)	40
5.3.3. Concentración de COT y Nt, relación estequiométrica (COT:Nt) y contenido de COT y Nt.....	42
5.3.4. Nitrógeno (NH ₄ ⁺ y NO ₃ ⁻) disponible.....	45
5.3.5. Fraccionamiento por densidad de la materia orgánica del suelo	46
5.3.5.1. Masa del material y concentración de carbono orgánico	46
5.3.5.2. Distribución del C orgánico del suelo	47
5.3.5.3. Caracterización por ATR-FTIR de la materia orgánica particulada (MOP)	49
5.4. ANÁLISIS BIOLÓGICOS	52
5.4.1. Carbono (Cmic) y nitrógeno (Nmic) inmovilizados en biomasa microbiana	52
5.4.2. Actividad enzimática (AE) y actividad enzimática específica (AEE).....	53
5.4.3. Mineralización potencial de carbono y coeficiente metabólico (qCO ₂).....	57
5.5. ANÁLISIS DISCRIMINANTE LINEAR (ADL) PARA PROPIEDADES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS.....	58
6. Discusión.....	61
6.1. CAMBIOS EN LOS RASGOS MACRO-MORFOLÓGICOS DE LOS SUELOS DURANTE LA TRANSICIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR A CAFÉ	61
6.2. CAMBIOS EN LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS EN LOS SUELOS DURANTE LA TRANSICIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR A CAFÉ.....	63
7. Conclusiones	73
8. Referencias	74
Anexos	85
ANEXO 1	85
ANEXO 2	87

Resumen

Las propiedades de los suelos pueden ser modificadas como consecuencia de las prácticas de manejo en los sistemas agrícolas, aunque en general se considera que los cultivos perennes permiten la incorporación de residuos orgánicos y reducen el impacto negativo a los suelos en comparación con los cultivos de ciclos anuales con manejo intensivo. En México han sido identificadas algunas zonas en donde se presenta la transición de sistemas agrícolas perennes con manejo intensivo a sistemas perennes con menor intensidad en el manejo, como es el caso de caña de azúcar a cafetales. La principal diferencia entre estos dos cultivos radica en la intensidad de las prácticas de manejo, pero a la fecha no hay información suficiente para entender el efecto de esta transición productiva en las propiedades de los suelos. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue analizar el cambio de las propiedades de los suelos durante la transición de sistemas de producción de caña de azúcar a café. El sitio de estudio se localiza en el municipio de Amatlán de los Reyes en el estado de Veracruz. Se seleccionaron tres condiciones con base en el manejo agrícola actual, con una historia de manejo previa en común de caña de azúcar. Los tratamientos de estudio fueron: cañaveral en activo (CA); cafetal recién establecido (CR); cafetal maduro productivo (CM). En cada sitio se estableció un diseño al azar estratificado y se colectaron muestras de suelos en los primeros 10 cm de profundidad para análisis físicos, químicos y biológicos; además, se describieron los rasgos macromorfológicos de cada sitio a través de la apertura de una calicata. Los resultados muestran que la concentración nitrógeno total (Nt) en CM mostró un enriquecimiento del 50% con respecto a CA. Aunque la concentración de carbono orgánico total no mostró diferencias, el fraccionamiento por densidad de la materia orgánica del suelo (MOS) mostró que, en CA, la materia orgánica particulada (MOP) fue la fracción más abundante, mientras que en CR y CM fue la MOS unida a minerales <math><63 \mu\text{m}</math> (MOMf). No solo la distribución de la MOS fue sensible a la transición productiva, también la composición química de la MOP por ATR-FTIR mostró que en CR y CM las señales con mayor intensidad están asociadas a carbohidratos y proteínas, mientras que en

CA las señales con mayor intensidad están asociadas a compuestos aromáticos. Adicionalmente, se observó un enriquecimiento de C y N en la biomasa microbiana (Cmic y Nmic) en el orden CM>CR>CA y la actividad enzimática específica (AEE) de β -glucosidasa (BGL) N-acetil glucosaminidasa (NAG), lipasa (LIP), polifenoloxisasa (POX) y deshidrogenasa (DES) y el coeficiente metabólico (qCO_2) mostraron un patrón en donde la eficiencia metabólica fue mayor en el orden CM>CR>CA. Además, se observó un aumento en la disponibilidad de N y en la eficiencia metabólica de la comunidad microbiana, con lo cual se puede concluir que la transición productiva provee de una ruta hacia un mejoramiento de muchas de las propiedades de los suelos.

Abstract

Soil properties can be modified as a consequence of management practices in agricultural systems. In general, it is considered that perennial crops that allow the incorporation of organic residues into the soil reduce the negative impact on soils in comparison with crops of annual cycles with intensive management. In Mexico, it has been identified that there is a transition from perennial with intensive practices agricultural systems to perennial fewer intensive systems in some areas, as is the case from sugar cane to coffee plantations. The difference between these two crops lies in the intensity of the management practices. Still, to date, there is not enough information to understand the effect of this productive transition on the properties of the soils. Therefore, the objective of this work was to analyze the change in soil properties during the transition from sugarcane to coffee production systems. The study site is located in the municipality of Amatlán de los Reyes in the state of Veracruz, three conditions were selected based on current agricultural management, but that had a previous productive history in common of sugar cane: active cane plantation (CA); newly established coffee plantation (CR); productive coffee plantation (CM). A stratified random design was established at each site, and soil samples were collected at a depth of 10 cm for physical, chemical, and biological analysis. The macromorphological features of each

site were described through the opening of a pit. The results show that the total nitrogen concentration (Nt) in CM showed enrichment of 50% concerning CA. Although the concentration of total organic carbon did not show differences, the density fractionation of soil organic matter (SOM) showed that, in CA, particulate organic matter (MOP) was the most abundant fraction, while in CR and CM, it was mineral bound SOM <63 μm (MOMf). Not only was the MOS distribution sensitive to the productive transition, but the chemical composition of the MOP by ATR-FTIR also showed that in CR and CM, the signals with greater intensity are associated with carbohydrates and proteins, while in CA, the signs with greater intensity are associated with aromatic compounds. An enrichment of C and N was observed in the microbial biomass (Cmic and Nmic) in the order CM>CR>CA and the specific enzymatic activity (EA) of β -glucosidase (BGL) N-acetyl glucosaminidase (NAG), lipase (LIP), polyphenol oxidase (POX) and dehydrogenase (DES) and the metabolic coefficient (qCO₂) showed a pattern where metabolic efficiency was higher in the order CM> CR> CA. An increase was observed in N availability and soil microbial metabolic efficiency with which it can be concluded that the productive transition provides a route towards an improvement of many of the properties of the soils.

1. Introducción

El suelo es un componente esencial para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres debido a su capacidad para sostener el crecimiento vegetal a través de la provisión de nutrientes esenciales para las plantas y condiciones físicas, químicas y biológicas favorables para su hábitat (Global Soil Partnership, 2020). A esta capacidad se le ha definido como fertilidad, la cual puede ser considerada como una propiedad emergente; ya que depende de la interacción de las tres fases, mediadas en gran parte por la actividad biológica, que constituyen al suelo: a) gaseosa (atmósfera del suelo), b) líquida (solución del suelo) y c) sólida (fracciones mineral y orgánica) (Nicolodi y Gianello, 2015). En consecuencia, cualquier fenómeno que influya sobre alguna de las fases del suelo, sus propiedades e interacciones, modificará su fertilidad (Morris y Blackwood, 2015). Esto último es observable debido al uso que la humanidad le da al suelo para la producción de alimentos, fibras y otros recursos, (Baldrian 2009; Fialho et al, 2013). Es así como los suelos pueden modificar su fertilidad en respuesta al tipo de manejo que se le dé. Por lo cual, es necesario aportar al conocimiento sobre cómo el cambio en las prácticas de manejo influye sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

1.1. Propiedades edáficas

El suelo es un sistema dinámico y complejo que puede ser descrito a partir de sus propiedades físicas, químicas y biológicas:

A) Propiedades físicas: Éstas están directamente relacionadas con el tamaño y el arreglo de las partículas sólidas, las cuales confieren el arreglo tridimensional que influyen sobre la movilidad y retención de los gases y líquidos (Weil y Brady, 2017). Algunas de las propiedades físicas son la textura, la densidad, la agregación, la estructura y la porosidad (FAO, 2006).

B) Propiedades químicas: Son las relacionadas con la disponibilidad, cantidad y balance elementos químicos y el ambiente reactivo en el cual se retienen o transfieren (Osman, 2013). Algunas de las propiedades químicas son: el pH, la

capacidad de intercambio catiónico (CIC), el porcentaje de saturación de bases (%SB) y la concentración de carbono, macro (p.e. N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (p.e. B, Cu, Fe, Mn) (FAO, 2006).

C) Propiedades biológicas: Aquellas relacionadas con los organismos, su identidad, abundancia, diversidad de las funciones que éstos desempeñan para mantener activo su metabolismo y las consecuencias de éstas (Osman, 2013). Particularmente, la microbiota edáfica influye muy activamente sobre el reciclaje y movilización de nutrientes a través del proceso de descomposición de la materia orgánica (MO) y de la transformación de nutrientes (Gessner et al., 2010).

Es conveniente resaltar que, si bien son agrupadas en tres clasificaciones diferentes la mayoría, si no es que todas, presentan relaciones estrechamente relacionadas con una o más propiedades. Existen variables que son transversales entre las propiedades edáficas, el caso más notable es la materia orgánica del suelo (MOS), la cual se puede definir como una mezcla heterogénea de moléculas orgánicas derivada de residuos sintetizados por organismos vegetales, animales y microbianos. Además, la MOS es producto de la resíntesis y descomposición parcial por la microbiota, la cual puede estar libre o en interacción con las partículas minerales del suelo (Bernux y Cerri, 2005; Hatten y Liles, 2019). Aunque la MOS sólo comprende en promedio el 5% de la masa de suelo, representa el mayor almacén de C orgánico, así como de macro y micronutrientes. (Chaudhari et al, 2013; Hatten y Liles, 2019; Sarker et al., 2018). La MOS aparte de fungir como almacén de elementos químicos, también está relacionada con la estructura y agregación del suelo, la capacidad de retención de agua, la regulación térmica del suelo, la capacidad de intercambio de iones, la formación de sitios de alta actividad biológica (hotspots), entre muchas otras (Hassink, 1997; Murphy, 2015; Hatten y Lilies, 2019). Con base en la diversidad de funciones en las que está involucrada la MOS, ésta se ha considerado como un regulador importante de la fertilidad del suelo (Nicolodi y Gianello, 2015).

1.2. Efecto del manejo agrícola sobre las propiedades del suelo

Se conoce como manejo agrícola al conjunto de prácticas utilizadas para mejorar o mantener el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. La combinación, el momento y la secuencia de las prácticas utilizadas dependen de las características biológicas de los cultivos, la estructura vegetal cosechada, los métodos de siembra, la edad de las plantas y las condiciones climáticas y del suelo, este último relacionado principalmente con la provisión de nutrientes a las plantas. Existen una gran diversidad de prácticas agrícolas, pero se ha puesto especial atención en algunas debido al efecto que tienen sobre las propiedades de los suelos principalmente en sistemas de secano. Algunas de estas son:

Arado mecanizado. Es definido como una descompactación basada en la disgregación física del suelo con la intención de optimizar la germinación, establecimiento de vástagos y/o crecimiento del cultivo, para la cual se emplean herramientas manuales, tracción animal o mecanización (Ahn y Hintze, 1990). Esta práctica mezcla las capas más superficiales del suelo con lo cual se homogenizan y dan origen lo que se denomina capa de arado u horizonte Ap. Así mismo, con la homogenización mecánica de esta capa ocurre la ruptura de los agregados y se altera negativamente la estructura natural del suelo (Yoo et al., 2011; Aziz et al., 2013). Cuando los agregados del suelo son destruidos, la MOS queda desprotegida y expuesta al ataque bioquímico que facilita su descomposición, y a mediano plazo puede favorecer la pérdida de MOS; (Hussain et al., 1999; Lou et al., 2012; Neugschwandtner et al., 2014).

Adicionalmente, algunos de los efectos negativos que acompañan al arado son, entre otros: pérdida de porosidad, aumento de la densidad aparente (DA), disminución del pH del suelo (acidificación) debido a la producción de ácidos orgánicos por la microbiota edáfica, la disminución de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) derivada de la disminución la MO (Hussain et al., 1999; Strudley et al., 2008).

Fertilización sintética. Se refiere a la adición de productos extraídos, refinados y/o manufacturados que contienen nutrientes en formas inorgánicas disponibles u

orgánicas potencialmente disponibles para las plantas y los cuales se emplean con la intención de optimizar la productividad de los cultivos (FAO, 2006). Sin embargo, el uso inapropiado de estos productos puede provocar impactos negativos en los suelos agrícolas como es la acidificación del suelo, principalmente por exceso de N (Zhang et al., 2020), que a largo plazo incrementa la solubilidad de otros elementos como el Al^{3+} y el Fe^{3+} y con ello la disminución de la disponibilidad del P (Bowman et al., 2008) y la actividad microbiana (Porta-Casanellas et al., 1994; FAO, 2006; Dong et al., 2012). La adición excesiva de nutrientes en formas inorgánicas puede favorecer la descomposición de la MOS y la transformación quimilitotrófica de N, lo que puede derivar en la promoción de la emisión de gases de efecto invernadero como CO_2 y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Dalal et al., 2003; Al-Kaisi et al., 2008; Ellert y Janzen, 2008).

Quema agrícola. Está basada en el empleo del fuego como una herramienta para la eliminación de malezas previo a la preparación del suelo para un nuevo ciclo agrícola o, como en el caso de la caña de azúcar, para facilitar la cosecha (SAGARPA, 2015). Su uso impacta sobre las propiedades del suelo en función de su intensidad, que está definida por la duración, temperatura máxima y frecuencia del evento de fuego y los cuales se expresan en diferentes efectos sobre el suelo o severidad (Santin y Doerr, 2016); por ejemplo, cuando la intensidad del fuego es alta, ~ 300 °C en la superficie, se observa un enrojecimiento del suelo debido a la transformación de óxidos de Fe y a la remoción total del material orgánico.

Cuando el evento de fuego es de baja a media intensidad se observa la presencia de una cubierta de material carbonizado y cenizas derivada de la carbonización de la materia orgánica y de la mineralización térmica, respectivamente (Certini, 2005; Santin y Doerr, 2016). Como expresión de una elevada severidad se ha observado que se incrementa significativamente la DA del suelo, a consecuencia del colapso de los agregados y la saturación de los poros del suelo por cenizas (Boerner et al., 2009; Certini, 2005). Otro efecto observado es la alcalinización debido a la liberación térmica de los cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) contenidos en la biomasa vegetal; esto conduce a su acumulación en el suelo y es conocido como “efecto de

encalado” (Knicker, 2007; Verma y Jayakumar, 2012; Mastrodonato et al., 2014). Cuando la MOS es transformada parcial o completamente produce una disminución sobre la capacidad de la regulación de térmica del suelo, la retención de humedad, la CIC y con ello la retención y disponibilidad de nutrientes (Verma y Jayakumar, 2012).

Las comunidades microbianas del suelo son particularmente sensibles al fuego, el cual altera su composición específica, biomasa y actividad (Hart et al., 2005). Se ha observado que el efecto del fuego modifica la relación en la composición de la comunidad microbiana, ya que ha sido reportado que posterior a algún evento de quema se incrementa la abundancia relativa de las bacterias como consecuencia de la disminución de los hongos, ya que estos últimos son más sensibles (Pietikäinen y Fritze, 1995) y en algunos casos extremos, se ha observado la completa esterilización del suelo superficial (Santin y Doerr, 2016). Así también, como consecuencia inmediata de los eventos de fuego, se ha observado la disminución de la actividad exoenzimática en los suelos, esto como resultado de la disminución de la biomasa microbiana activa y también por la sensibilidad de algunas de estas moléculas a la desnaturalización térmica, por ejemplo, la β -glucosidasa y la ureasa (Boerner y Brinkman, 2003; Knicker, 2007). Sin embargo, también ha sido observado que ocurre un incremento en la actividad de algunas lacasas como la polifenol oxidasa y que se atribuye al cambio en la composición de la MOS hacia compuestos con mayor grado de aromaticidad (Boerner y Brinkman, 2003; Knicker, 2007). La cuantificación de los cambios, en magnitud y sentido, de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos son de gran ayuda para la evaluación del impacto de las diferentes prácticas de manejo (Von Lützow et al., 2007; Mendham et al., 2004).

1.3. Procesos biogeoquímicos en sistemas agrícolas

En los suelos ocurren procesos que regulan el almacenamiento, la transformación y los flujos de materia y energía. Cuando en estos procesos están involucrados los organismos vivos entonces toman el nombre de procesos biogeoquímicos (Acosta-Martínez et al., 2018). En los ecosistemas intervenidos por el humano, como en el caso de los sistemas agrícolas, estos procesos biogeoquímicos son modificados a partir de la intensidad del manejo que se les dé a los sistemas agrícolas. Por ejemplo, un fenómeno común es la exportación de biomasa en forma de cosecha, lo cual repercute en la disminución de la incorporación de residuos vegetales al suelo y con ello la posible limitación de C disponible para los microorganismos, la pérdida de nutrientes contenidos en la biomasa vegetal y la disminución de la materia orgánica del suelo (Kuzyakov y Zamanian, 2019). La disminución de la MOS se presenta de manera más rápida en las fracciones menos protegidas, es decir, disminuyen las fracciones no protegidas mediante interacciones con los minerales del suelo, como son la materia orgánica disuelta (MOD) y la materia orgánica particulada (MOP), y de forma más lenta en aquella que la materia orgánica se asocia a las partículas minerales gruesas (2000 a 53 μm , tamaño arena) y finas (<53 μm , tamaño limo y arcilla) (MOMg y MOMf, respectivamente) (Von Lützow et al., 2007; Moni et al 2012; Figura 1).

No sólo la cantidad de MOS es susceptible a modificarse, sino también su composición química en función del manejo agrícola, particularmente por el tipo de cultivo (Sanaullah et al., 2019) y por influencia del fuego (Certini, 2005), de forma particular en la MOP (Von Lützow et al., 2007). La modificación de la composición química de la MOS no solo repercute en la disponibilidad de sustratos orgánicos para las comunidades microbianas, sino que también puede impactar en otras propiedades tal como la CIC. Al respecto, se ha determinado que cuando la MOS es condensada térmicamente disminuye su capacidad para intercambiar cationes con el medio por la pérdida de grupos funcionales y que, junto con la mayor concentración de iones,

aumenta de forma importante la saturación de bases en los suelos (Mastrolonardo et al., 2015).

Paralelamente a la concentración de carbono orgánico y sus fracciones, la concentración y formas químicas de nitrógeno (N) en los suelos también son susceptibles a ser modificadas a consecuencia del tipo e intensidad de manejo agrícola. Particularmente, la concentración de las formas de N que pueden ser adquiridas directamente por las plantas, como amonio (NH_4^+) y nitrato NO_3^- , son sensibles a la adición de fertilizantes sintéticos (Sutton et al., 2011). Una de las fracciones de N menos estudiadas es la fracción orgánica (Norg), la cual está más fuertemente ligada a la incorporación de residuos vegetales que dependen del tipo de cultivo y pueden ser modificados por efecto de las quemadas, así como por el desarrollo de la biomasa microbiana. La asimilación del N orgánico por los microorganismos del suelo se da a través del proceso de reducción estructural mediante enzimas específicas (p.e. N-acetil glucosaminidasa o NAG), cuya consecuencia es la liberación de iones inorgánicos (Baldrian, 2009). En general, la transformación de los elementos químicos en los suelos está muy estrechamente relacionados con la eficiencia metabólica de la comunidad microbiana y el uso de los nutrientes, es decir, si son invertidos en aumentar su biomasa al quedar inmovilizados (C_{mic} y N_{mic}) o si son utilizados para realizar las actividades básicas de mantenimiento fisiológico o la adquisición de nutrientes (Raiesi y Beheshti, 2014, Figura 1).

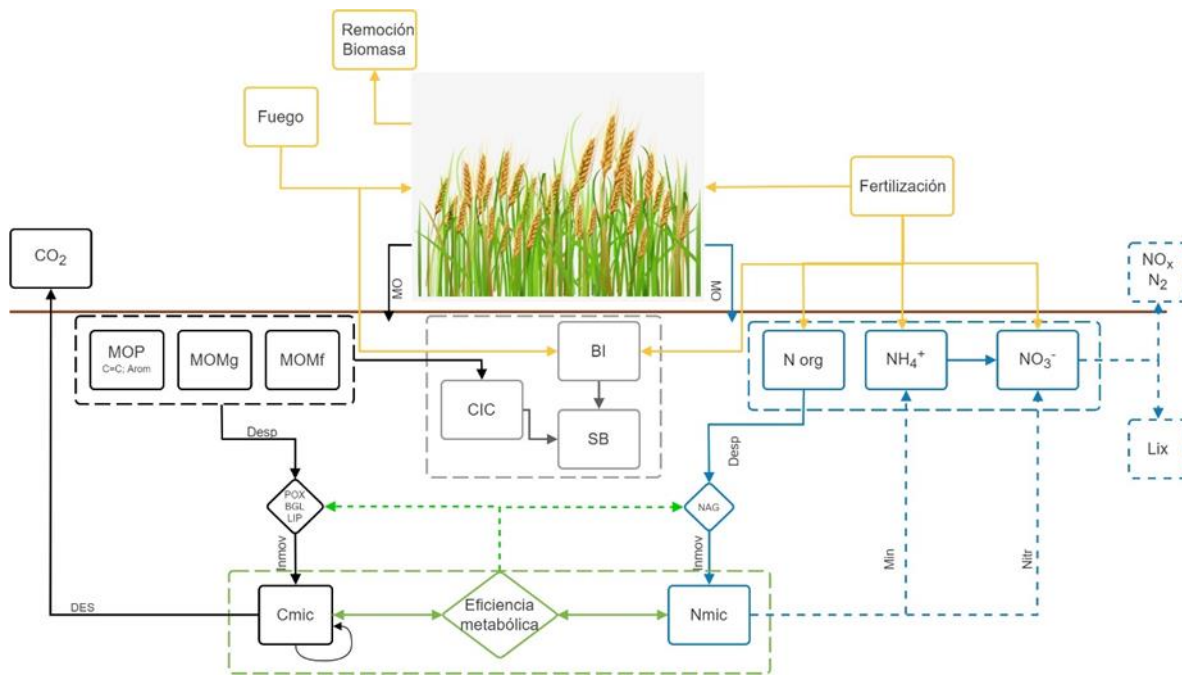


Figura 1. Funcionamiento de suelo agrícola a partir de sus propiedades. Se esquematiza la interacción de propiedades químicas y biológicas del suelo y cómo el uso de algunas prácticas de manejo agrícolas influye en la magnitud de interacción entre estas. CO₂: dióxido de carbono; NO_x: óxidos de nitrógeno; N₂: nitrógeno molecular; NH₄⁺: amonio; NO₃⁻: nitrato; N org: N orgánico; Cmic: C inmovilizado en biomasa microbiana; Nmic: N inmovilizado en biomasa microbiana; MO: materia orgánica; MOP: MO particulada; MOMg: MO unida a minerales >53 μm; MOMf: MO unida a minerales <53 μm; CIC: capacidad de intercambio catiónico; BI: bases intercambiables; SB: % de saturación de bases; POX: polifenol oxidasa; DES: deshidrogenasa; BGL; β-glucosidasa; LIP: lipasa; NAG: N-acetil glucosaminidasa; Desp: despolimerización; Inmov: inmovilización; Min: mineralización; Nitr: nitrificación.

1.4. Producción agrícola de café y caña de azúcar

México está clasificado como el décimo primer productor agrícola a nivel mundial; después de los cereales (p.e. maíz, trigo, arroz, avena), la caña de azúcar (*Saccharum* sp.) y el café (*Coffea arabica*) son los cultivos más importantes para la producción nacional (SAGARPA, 2018; FAO, 2020). México es el sexto productor mundial de caña de azúcar, con 5.55 millones de toneladas anuales y 673,000 ha cosechadas, lo que equivale a 3.4% de suelo destinado para producción agrícola en

el país (Santillán-Fernández et al., 2016). Particularmente, el estado de Veracruz es el primer estado productor de caña de azúcar a nivel nacional con 37% de la producción total y cuenta con 22 de los 54 ingenios azucareros del país (SAGARPA, 2015), actividad en la cual 400,000 personas trabajan de forma directa (Santillán-Fernández et al, 2014).

Así mismo, México es el décimo primer productor de café a nivel mundial y su producción representa el 0.66% del PIB agrícola nacional y el 1.34% de la producción de bienes agroindustriales nacionales. En México hay 15 estados productores de café; Veracruz aporta el 24% del volumen nacional, lo cual lo coloca como el segundo productor (SAGARPA, 2018). Uno de los municipios del estado de Veracruz en donde estos dos cultivos están ampliamente establecidos es Amatlán de los Reyes, donde la producción agrícola del municipio, en 2017, fue de 2100 toneladas de café (variedad cerezo) y 173,900 toneladas caña de azúcar.

1.4.1. Manejo agrícola en los sistemas de producción de caña de azúcar y café

En el cultivo de caña de azúcar es común el uso de agroquímicos para el control de malezas y plagas y fertilizantes (Nihei et al., 2015); en las labores de preparación de suelo no es común que se considere la incorporación de residuos orgánicos o evitar el surcado a favor de la pendiente, lo que favorece la erosión y degradación química de los suelos (Ochoa-Neira et al., 2010). Adicionalmente, en estos sistemas es común el uso de fuego como práctica de manejo previo al establecimiento del cultivo, para la eliminación la vegetación natural, y en cada ciclo agrícola para facilitar la cosecha (SAGARPA, 2015). Se ha observado que después de 20 años de producción convencional de caña de azúcar disminuye el contenido de MOS hasta en 28% y exhibe una tendencia al incremento en la densidad aparente, aunque sin detrimento en la productividad. Por otro lado, ha sido demostrado que la cosecha y quema de los residuos de la misma (rastrojo), causa una pérdida de hasta 11 Kg ha⁻¹ y una reducción de hasta 23% en el rendimiento de los cultivos. Lo anterior, se puede asociar a una

mayor cantidad de insumos externos aplicados para mantener el crecimiento vegetal (Naranjo de la F et al., 2006). Por otro lado, existen prácticas consideradas poco intensivas para el manejo de cultivos de caña de azúcar como son la rotación de cultivos, establecimiento de nuevos cultivos en sitios en donde se producía caña de azúcar con anterioridad, mecanización para el mejoramiento de la salud vegetal, cosecha “en verde” y uso de los residuos de la cosecha como abono verde en donde se suprime el fuego como práctica esencial, uso de compostas y supresión de fertilizantes inorgánicos (Aguilar-Rivera et al., 2018) y en algunos casos como en Cuba, el uso de agentes biológicos como insectos y anélidos antagonistas de las plagas comunes de los cultivos de caña de azúcar (Oppenheim, S., 2001).

Los sistemas de producción de café son muy diversos, y aunque el primer efecto que tienen los cultivos de café es la remoción de la cobertura vegetal natural, la intensidad de la remoción depende de la selección de manejo, ya que existen sistemas rústicos tradicionales, policultivos tradicionales, policultivo comercial, monocultivo de sombra y monocultivo sin sombra o café de sol (Moguel y Toledo, 1999). En los cafetales de sol, se ha observado que existe la tendencia de establecer plantaciones de cafetales sobre suelos anteriormente utilizados para la producción agrícola y que ya han sido abandonados o dejados en descanso (Rice, 1999). Sin embargo, existen sistemas de sol donde se incorporan otras especies, de las cuales se obtienen alimentos y/o materias primas, especialmente para autoconsumo de los productores (Matoso-Campanha et al., 2004; Watson y Achinelli, 2008). Las prácticas agrícolas asociadas a la cosecha en los cafetales son casi exclusivamente de forma manual, es decir, sin la utilización de maquinaria agrícola, entre las que se incluyen el deshierbe, la poda de la planta y la cosecha; así también el tiempo para la sustitución de plantas es muy prolongado por lo cual el posible impacto por remoción de suelo, arado o compactación es muy bajo (Luong y Tauer, 2006). En estos sistemas se evita la presencia de fuego y se favorece en la mayoría la adición de agroquímicos para fertilización, control de plagas y enfermedades (Sanullah et al., 2019).

Desde hace algunos años, se ha observado que en México existen zonas de transición de sistemas de caña de azúcar a la introducción de cafetales. Esto puede estar motivado, en parte, por las políticas gubernamentales en apoyo a la producción de café (CEDRSSA, 2019). Los cultivos de café tienden a ser considerados más amigables con el ambiente, ya que en estos sistemas de producción se utiliza un manejo de menor impacto para el suelo que pueden ayudar en la prevención de la erosión y/o compactación del suelo (Tully et al., 2013) y que pueden cumplir la función de refugio y hábitat para distintos organismos (Rojas-Sánchez et al., 2012).

Esta mejor condición asociada a los sistemas de café también involucra a las propiedades químicas y biológicas de los suelos. Por ejemplo, debido a que en algunos cafetales se introducen leguminosas se favorece la fijación biológica del nitrógeno y el cual puede ser una fuente importante de nitrógeno para los cafetos (Roskoski, 1982). Ha sido demostrado que cuando se mantienen las herbáceas entre los cafetos, se previene la acidificación del suelo e incluso se incrementa el contenido de C y N totales en 25% y el P disponible en 59% en comparación con sistemas en los cuales se removieron las herbáceas (Sarno et al., 2004). Por si mismo el establecimiento de los cafetos como cultivo perenne es considerado un método para aumentar el contenido de COS sin disminuir las áreas de producción de alimento y/o materias primas (Ledo et al., 2020), ya que cuando un suelo agrícola de ciclo anual cambia al uso de especies perennes, existe un aumento en la biomasa vegetal presente a lo largo de un año y con ello la entrada de materia orgánica al suelo se ve incrementada en un 26% en el caso de la transición entre cultivo tradicional intensivo e introducción de especies perennes; esta transición además se acompaña de un incremento en la riqueza de las comunidades de fauna y microbiota del suelo, lo cual suele ser benéfico para el funcionamiento del sistema (Guo y Gifford, 2002; Leganière et al., 2010).

2. Justificación

En México, existen trabajos en distintas regiones geográficas que se enfocan en el estudio del efecto del manejo agrícola sobre fertilidad de los suelos, de los cuales la mayoría han evaluado la transición de los sistemas productivos y los cuales comúnmente tratan la comparación de una condición natural hacia un sistema manejado (p. e. Anaya y Huber-Sannwald, 2015; Medorio-García et al., 2020) o en sistemas productivos que han sido abandonados (p. e. Hernández-Becerra et al., 2016). Pero la transición entre sistemas productivos es algo escasamente estudiado, uno de los sistemas que puede ser interesante por las implicaciones económicas y ambientales que presenta es la transición de cultivos de caña de azúcar a café, la cual ha presentado un amento en ciertas regiones del país como es en el estado de Veracruz. Diversos trabajos han evaluado el impacto del cambio de uso de suelo y el tiempo de las prácticas de producción de caña de azúcar (Cerri et al., 2011; Souza et al., 2012; Anaya y Huber-Sannwald, 2015; de Souza-Junior et al., 2017; Medorio-García et al., 2020), pero es muy escaza la información del efecto que conlleva realizar una transición productiva de estos sistemas, sobre todo en el funcionamiento de los suelos y sus indicadores como es la actividad microbiana y la distribución de la materia orgánica del suelo. Por lo anterior, es necesario generar información sobre la modificación de las propiedades de los suelos a favor de tener elementos para evaluar el impacto del cambio del sistema de manejo sobre la fertilidad de los suelos en los agroecosistemas.

2.1. Pregunta de investigación

¿La transición productiva de caña de azúcar a cafetales modifica la composición química de la materia orgánica y la actividad microbiana en suelos agrícolas de Amatlán de los Reyes, Veracruz?

2.2. Hipótesis

Los suelos en transición de sistemas de producción de caña de azúcar a café presentarán un incremento en la concentración y contenido de MOS y un cambio en la actividad microbiana asociada debido a la reducción en la intensidad de las prácticas de manejo agrícola.

3. Objetivo General

Analizar el cambio de las propiedades de los suelos durante la transición de sistemas de producción de caña de azúcar a café en Amatlán de los Reyes, Veracruz

3.1. Objetivos Particulares

- Caracterizar en campo los principales rasgos macromorfológicos de los suelos sujetos a la transición de producción de caña de azúcar a café.
- Evaluar el efecto de la transición de producción de caña de azúcar a café sobre la distribución y composición de materia orgánica del suelo.
- Caracterizar la actividad y eficiencia metabólica de la comunidad microbiana en los suelos sujetos a la transición de producción caña de azúcar a café.

4. Materiales y Métodos

4.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Amatlán de los Reyes en el estado de Veracruz (Fig. 2), ubicado entre los paralelos 18° 46' y 18° 58' de latitud norte y los meridianos 96° 49' y 96° 58' de longitud oeste. Se encuentra a una altitud entre los 500 y los 1300 m.s.n.m. Colinda al norte con los municipios de Córdoba, Ixhuatlán del Café y Atoyac; al este con los municipios de Atoyac y Yanga; al sur con los municipios de Yanga, Cuichapa, Omealca, Coetzala, Naranja y Fortín y al oeste con los municipios de Fortín y Córdoba. Su clima principal está catalogado como cálido húmedo con lluvias en verano (Aw) (García, 1998), con una temperatura media anual de 18°C y precipitación anual media de 1,807 mm (SEFIPLAN, 2017). Los suelos dominantes están clasificados como Acrisoles y Luvisoles, los cuales son principalmente utilizados para la producción agrícola de caña de azúcar y café, aunque aún persisten remanentes de bosque templado caducifolio, selva mediana subperennifolia con predominancia de especies como el ocozote, encino, fresno, álamo y sauce (RMGIR, 2011).

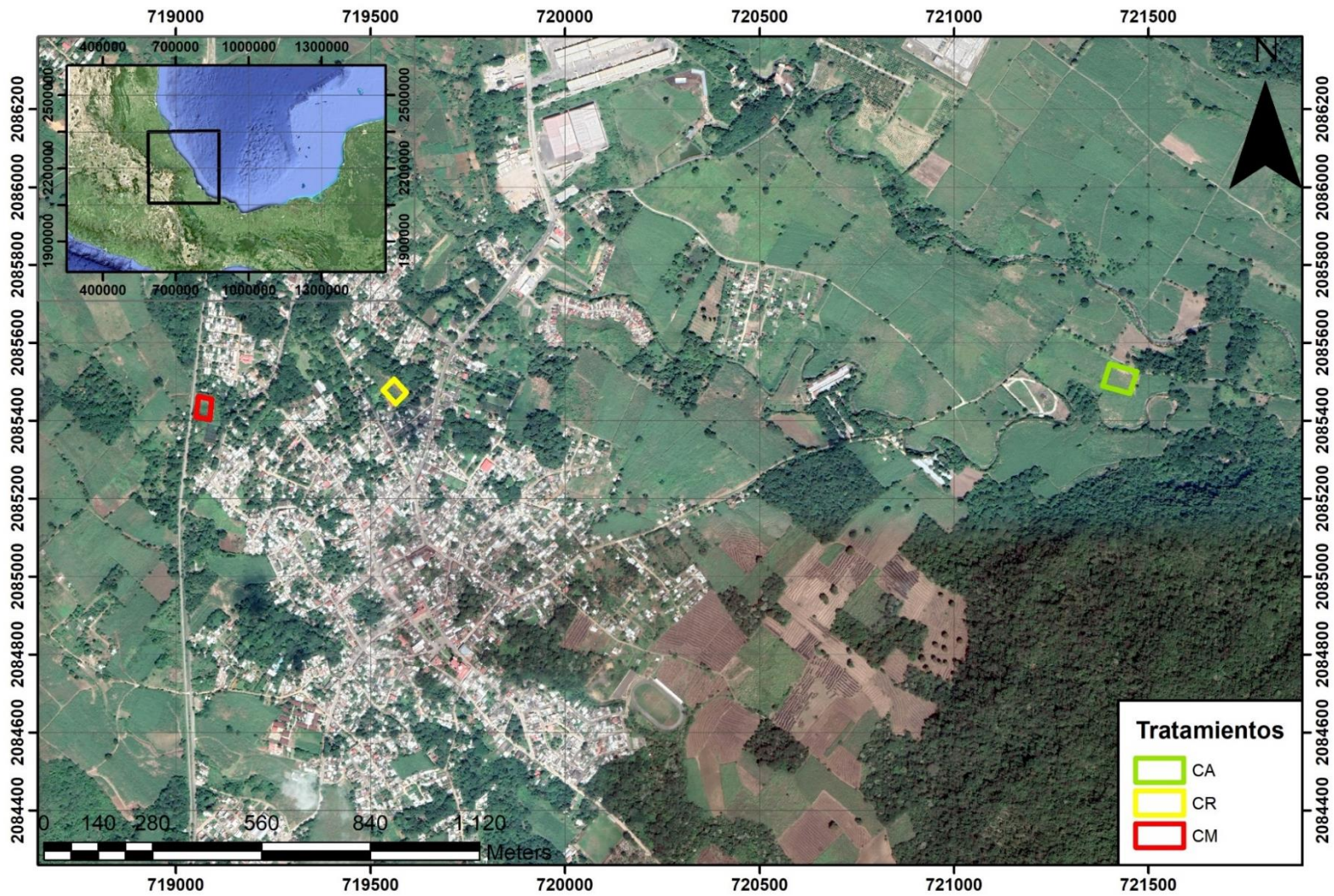


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo en el municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz. CA: Caña en activo, CR: cafetal reciente, CM: cafetal maduro.

Previo a la selección de los sitios de muestreo, se recurrió a los productores locales quienes son propietarios de los predios y con quienes se socializó el objetivo del estudio. Una vez de conformidad con los productores se procedió a identificar algunas parcelas que representan las condiciones a través de las cuales se ha dado la transición de producción de caña de azúcar a café. Una vez identificadas se seleccionaron tres condiciones: a) Caña de azúcar (CA), sistema de producción de *Saccharum* sp. con más de 50 años en activo y en la cual recientemente (1 año) se ha dejado de fertilizar, quemar y cosechar; b) Cafetal reciente (CR), sitio donde se produjo caña de azúcar durante >50 años y se dejó en descanso durante 8 años, en los cuales se estableció vegetación herbácea y recientemente (5 meses) fue arado y se plantaron cafetos (*Coffea arabica* var. Oro azteca) y plataneros (*Musa paradisiaca*), ambos en estadio juvenil; c) Cafetal maduro (CM) sistema con producción de caña de azúcar al menos 50 años, 10 años de producción de café y plátano, el cual pasó por las condiciones previas (Fig. 3).

En los tres sistemas, la fertilización se realizó con base en productos sintéticos. En el sistema de caña de azúcar las labores en el suelo para el establecimiento de nuevas plantas de caña se realizaron 10 años previo a la fecha de muestreo para la sustitución de plantas mientras en los sistemas de café sólo cuando se establecieron las plantas. Así también, el uso de fuego se restringió sólo al sistema de producción de caña. Los tres sistemas se encuentran establecidos en sitios con una pendiente <10% en una pendiente media por igual en donde no se percibe acumulación de material por arrastre superficial.



Figura 3. Transición de sistemas utilizados. a) Cañaveral productivo con manejo convencional (CA); b) Cafetal recién establecido (CR); c) Cafetal maduro (CM).

4.2. Trabajo de campo

4.2.1. Diseño de muestreo y colecta de muestras

Se seleccionó una parcela representativa de cada una de las condiciones previamente descritas, cada una estableció un muestreo con base en un diseño al azar estratificado. Para ello, se estableció un transecto principal de 50 m orientado de forma perpendicular a la pendiente principal, la cual para los tres sitios fue <5%. Sobre el transecto principal, se marcaron cinco secciones de 10 m de ancho y al interior de cada una de estas se estableció aleatoriamente un transecto perpendicular de 10 m de longitud. Cada 2 m sobre cada uno de los cinco transectos perpendiculares se colectó una muestra de suelo de 0 a 10 cm de profundidad con la ayuda de una barrena tipo holandesa de 7.5 cm de diámetro (Fig. 4). Las cinco muestras de cada transecto se mezclaron para formar una muestra compuesta, y con esto se obtuvieron cinco muestras compuestas por cada condición. Cada muestra fue guardada individualmente en bolsas herméticas, rotulada y colocada en oscuridad y refrigeración a 4°C hasta su análisis. Adicionalmente, al centro de cada uno de los transectos de 10 m se tomó una muestra inalterada en un cilindro de 100 cm³ para el cálculo de la densidad aparente, con la ayuda de una barrena, estas muestras se sellaron con papel aluminio para evitar pérdida de material.

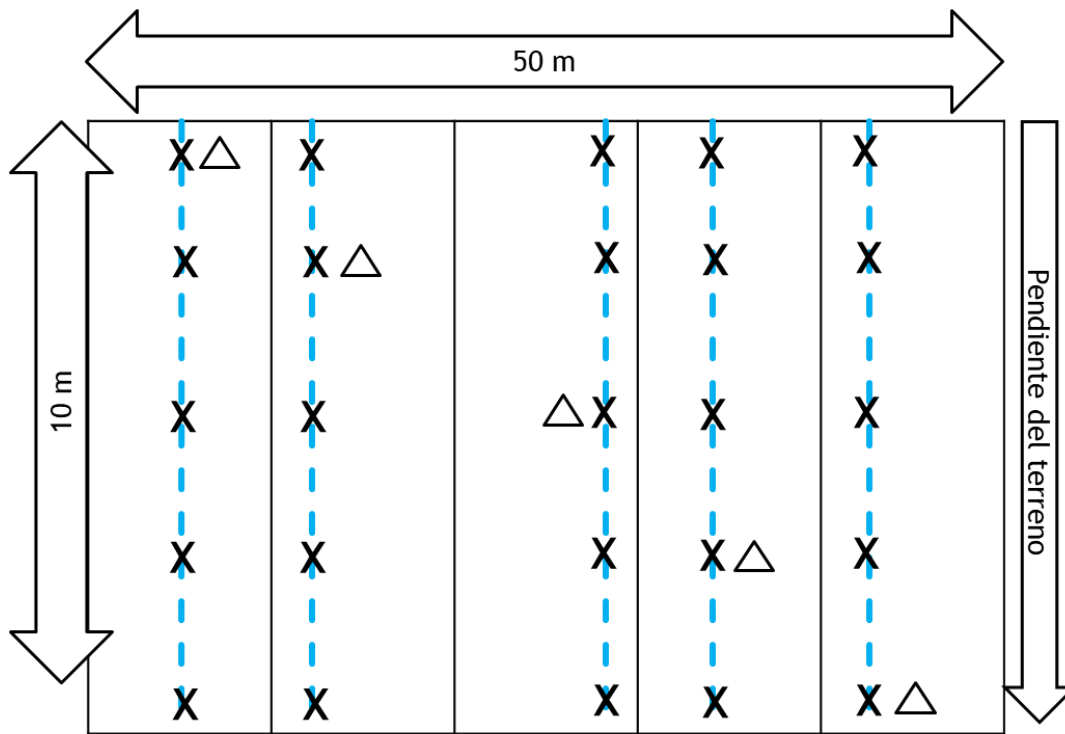


Figura 4. Diseño de muestreo al azar estratificado. La línea azul punteada representa los transectos de muestreo, las equis representan los puntos de muestreo de submuestra y los triángulos abiertos representan los sitios de toma de núcleos para cálculo de la densidad aparente.

4.2.2. Descripción de suelos

Al centro de cada una de las tres parcelas se abrió una calicata de hasta 100 cm de profundidad, se delimitó cada uno de los horizontes y se describieron sus principales rasgos físicos y la reacción cualitativa en campo para la descripción de la presencia de carbonatos, materia orgánica y alófanos (Siebe et al., 2017).

4.3. Análisis de laboratorio

4.3.1. Análisis físicos

4.3.1.1. Contenido de humedad

Se pesaron 40 g de suelo fresco y se colocaron en una charola limpia previamente pesada por triplicado. La charola con el suelo se colocó en un horno de circulación forzada a 105°C durante 72 horas. Posteriormente, se registró el peso de cada charola con suelo seco y se le restó el peso de la charola, de esta manera se obtuvo el peso seco de la muestra y por diferencia el contenido de humedad expresado en porcentaje (Reynolds, 1970).

4.3.1.2. Densidad aparente

Los cilindros de 100 cm³, mencionados en el apartado 4.2.1, se secaron en un horno a 105 °C por 72 h y se determinó el peso del suelo seco en el volumen conocido del cilindro (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010).

4.3.1.3. Textura

Para el análisis textural se utilizaron 10g de suelo seco a 105 °C y tamizado a través de una de malla con apertura de 2 mm. Las muestras fueron tratadas para eliminar agentes de floculación o cementación como son óxidos de hierro y materia orgánica (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010).

Para la eliminación de los óxidos de hierro se agregaron 50 mL de solución de citrato-bicarbonato de sodio 0.3 M y se colocaron a baño maría a 80°C. Una vez que la muestra alcanzó la temperatura máxima, se le agregaron 5 g de ditionito de sodio y se agitó con una varilla de vidrio. La muestra se mantuvo a baño maría hasta el cambio de color a tono grisáceo, se dejó enfriar y se procedió al tratamiento para eliminación de materia orgánica (MO). Para la eliminación de MO, se agregaron 20 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% y colocó en una plancha de calentamiento a 60°C hasta la evaporación completa de la fase líquida, aproximadamente 24 h.

Una vez que se realizaron los pretratamientos, a las muestras se les agregó 10 mL de hexametáfosfato de sodio (NaPO₃)₆) a una concentración de 50g/L y se

pusieron en agitación a 150 rpm durante 48 h. Posteriormente las muestras fueron cribadas a través de un tamiz con luz de malla de 53 μm , el material retenido en la malla se enjuagó con agua desionizada hasta que el líquido perdió turbidez; posteriormente, el material se recuperó y se colocó en capsulas de porcelana y se secó a 105 °C durante 72 h y se registró el peso, este material corresponde a la fracción de partículas tamaño arenas (2000 a 53 μm). El material que pasó por el tamiz se vertió en una probeta de vidrio de 1000 mL y se llenó con agua destilada; posteriormente, las muestras se agitaron, con ayuda de una varilla adaptada con un disco perforado en un extremo, durante 60 segundos.

Se determinó el tiempo de reposo para la precipitación de las partículas tamaño limo (3 h, 51 min. y 12 s) con lo cual una vez pasado ese tiempo las únicas partículas en suspensión corresponden a la fracción de partículas tamaño arcillas. En ese momento se tomó una alícuota de 25 mL con una pipeta volumétrica y el contenido se vertió en charolas de aluminio y las cuales colocaron a 105°C durante 72 h. Una vez secas las muestras se pesaron y se calculó la proporción de arcillas con base en el volumen total y se ponderó con base en el peso de la muestra total. El porcentaje de partículas tamaño limo se obtuvo como la diferencia de la suma de la masa de arcillas y de arenas menos la masa de la muestra total.

4.3.2. Análisis químicos

4.3.2.1. pH activo (1:10 p/V), pH potencial (1:10 p/V) y capacidad buffer

El pH activo se cuantificó a partir de 5g de suelo fresco en vasos de nalgen, a los cuales se les agregó 50 mL de agua Milli Q mientras que para el pH potencial se hizo a partir de 5 g con 50 mL de CaCl₂ 0.01 M, ambas muestras se agitaron durante 30 minutos a 140 rpm. Mientras las muestras estaban en agitación, se calibró el potenciómetro, marca Corning equipado con electrodo de vidrio, con soluciones buffer de pH 4 y 7; una vez concluida la agitación, se introdujo el electrodo en la muestra suspendida mediante agitación magnética (Minasny et al., 2011).

Una vez obtenidos los valores de pH activo y pH potencial, se realizó la diferencia entre estos para obtener el valor de la capacidad buffer:

$$\text{Capacidad buffer del suelo} = \text{pH Ac} - \text{pH Pot}$$

4.3.2.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Cationes intercambiables (CI) y porcentaje de Saturación de Bases (%SB)

La determinación consistió en agregar acetato de amonio 1N para saturar la superficie de intercambio del suelo con el ion amonio y posteriormente se enjuagó con alcohol etílico el exceso del saturante. La determinación CI se realizó análisis con espectroscopía de plasma con acoplamiento inductivo (ICP/AES) de acuerdo a la Norma ISO 11885:2007 por AGQ Labs.

El %SB se calculó de acuerdo con lo descrito por Fageria (2008):

$$\%SB = \frac{\Sigma(Ca, Mg, K)}{CIC} * 100$$

En donde Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ representan la concentración de cationes intercambiables en meq/100 g y CIC representa la capacidad de intercambio catiónico.

4.3.2.3. Carbono Orgánico Total (COT)

La determinación de COT fue realizada por AGQ Labs mediante Espectroscopía Infrarroja Cercana (NIR por sus siglas en inglés). Los datos son reportados en mg g^{-1} .

4.3.2.4. Nitrógeno total (Nt)

El Nt se realizó de acuerdo con el método Dumas (Kristen y Grunbaum, 1955) el cual se caracteriza por la pirolisis completa de la muestra y la cuantificación del contenido de NT en los gases de combustión mediante conductividad térmica por métodos automatizados. Este análisis fue realizado por el laboratorio AGQ.

4.3.2.5. Nitrógeno disponible (NH_4^+ y NO_3^-)

Se pesaron 10 g de suelo fresco en vasos de nalgén y se les agregó 50 mL de cloruro de potasio (KCl) 2N y se colocaron en agitación a 120 rpm durante por 30 min. Posteriormente, las muestras se filtraron a través de filtros de papel Whatman No. 1 y el filtrado se recuperó en viales de cristal. La cuantificación de la concentración de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) se realizó en un analizador segmentado de flujo continuo, acoplado a un espectrofotómetro marca SEAL modelo AA3 de acuerdo con los métodos del fabricante.

4.3.2.6. Concentración de C y N en biomasa microbiana (C_{mic} y N_{mic})

Se pesaron 20 g de suelo fresco por duplicado, cada una de las muestras se introdujo en un desecador de vidrio al cual previamente se le había colocado una caja Petri con agua y cubierta por un papel filtro. A uno de los desecadores se les colocó un vaso vidrio con 80 mL de cloroformo (CHCl_3), se cerró herméticamente y se conectó a un sistema de vacío durante 10 min, se dejó reposar 10 min y se volvió a conectar el vacío durante 30 min para asegurar la saturación de la atmosfera interior con CHCl_3 . El otro desecador sólo se selló y ambos fueron colocados en una incubadora por 24 h a 25 °C en oscuridad. Posteriormente, se sacaron los desecadores de la incubación, se destaparon y se pusieron a ventilar en una campana de extracción por 4 h, hasta que se evaporó completamente el CHCl_3 . Una vez pasado el tiempo de ventilación, se agregaron 80 mL de K_2SO_4 a cada una de las muestras y se agitaron a 150 rpm por

30 min. Pasado el tiempo de agitación, las muestras se pasaron por filtro Whatman No. 1 (Chávez-Vergara et al., 2014; 2016).

Determinación de C_{mic} : De cada una de las muestras duplicadas (fumigada y no fumigada), se tomó una alícuota de 0.5 mL de la solución resultante del filtrado en la cual se cuantificó la concentración de C total en el analizador UIC modelo CM 5012. La concentración del C_{mic} fue la diferencia entre la concentración de C del tratamiento fumigado menos la concentración de C del tratamiento no fumigado y a cuyo resultado se le aplicó el factor de corrección $K_{EC}=0.45$ (Joergensen, 1996).

Determinación de N_{mic} : Se tomó una alícuota de 30 mL de la solución del filtrado y se colocaron en tubos de vidrio para digestión de 250 mL y se les adicionó 0.6 mL de $CUSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.19 M y 10 mL de H_2SO_4 concentrado y se colocaron a $380^\circ C$ hasta su completa digestión. Una vez terminada la digestión ácida, el contenido del tubo se aforó en matraces de 50 mL y posteriormente se filtró a través de papel Whatman No. 1. La cuantificación de la concentración de N total en las muestras fumigadas y no fumigadas se realizó en el analizador AA3 marca SEAL. La concentración de N_{mic} fue calculó como la diferencia entre el tratamiento fumigado menos el tratamiento no fumigado y se corrigió mediante el factor de corrección $K_{EN}=0.54$ (Joergensen y Mueller, 1996).

4.3.2.7. Contenido de COT y Nt

Con base en la densidad aparente, la profundidad del muestreo y la concentración de COT y Nt se calculó el contenido en ambos en las condiciones evaluadas. El cálculo realizado fue:

$$\text{Contenido de COT o Nt (g m}^2\text{)} = VOL \times DA \times (COT \text{ o Nt})$$

dónde **VOL** es el volumen del suelo en 1 m^2 a 0.1 m de profundidad, **DA** es la densidad aparente, **COT** o **Nt** representan la concentración de carbono orgánico o nitrógeno total.

4.3.2.8. Fraccionamiento por densidad y tamaño de partícula y cuantificación de C orgánico

Se pesaron 10 g de suelo fresco en tubos para centrífuga y se agregaron 35 mL de una solución densa (2 g cm^{-3}) de politungstato de sodio ($3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y cinco esferas de vidrio (5 mm de diámetro), las muestras se colocaron horizontalmente y se mantuvieron en agitación a 120 rpm por 16 h. Cumplido el tiempo de agitación, se centrifugaron las muestras a 6000 rpm y 2°C por 20 min. El sobrenadante se filtró a través de una membrana de nitrocelulosa con luz de $0.45 \mu\text{m}$ en un sistema de filtrado Millipore®, una vez filtrado todo el contenido del tubo, se enjuagó la membrana con la muestra tres veces y posteriormente se recuperó el material retenido en una capsula de porcelana y se puso a secar a 70°C durante 72 h, esta fracción corresponde a la materia orgánica particulada (MOP).

Al material contenido en el tubo se le adicionó agua y centrifugó para el eliminar el politungstato de sodio residual, posteriormente se adicionó agua al tubo y se agitó para realizar un tamizado en húmedo a través de una malla de $63 \mu\text{m}$, se recuperó el material que pasó ($<63 \mu\text{m}$) y el que se quedó retenido en la malla ($<2000 \mu\text{m} - >63 \mu\text{m}$), los cuales corresponden a la materia orgánica unida a minerales en la fracción fina (MOMf) y gruesa (MOMg), respectivamente (Von Lützow et al., 2007). Las fracciones fina y gruesa se vertieron individualmente en cápsulas de porcelana para su secado a 70°C por 72 h. Una vez secas las tres fracciones de la materia orgánica (particulada, fina y gruesa) se cuantificó la masa seca de cada una.

Posteriormente, las muestras de cada fracción se pulverizaron en un molino de esferas marca Restch modelo MM400 a durante 30 s a 1800 golpes por minuto. A las muestras pulverizadas se les cuantificó la concentración de COT en un Analizador de carbono Total Carbon Analyzer marca UIC modelo CM 5012 basado en combustión seca y detección coulométrica del CO_2 liberado (Huffman, 1977).

Con los datos obtenidos se calculó la proporción del almacén de COT presente en cada fracción de la siguiente manera:

$$C_{fracc} = Prop_{fracc} \left(\frac{Conc_{COT}}{1000} \right)$$

donde **Prop fracc** es la proporción de la muestra con respecto al total y **Conc COT** hace referencia a la concentración de carbono presente en la muestra analizada.

4.3.2.9. Análisis de la materia orgánica particulada mediante espectroscopía infrarroja (ATR-FTIR)

Con las muestras secas y molidas de la materia orgánica particulada (MOP) se formó una muestra compuesta por condición, y las cuales fueron analizadas por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con reflectancia total atenuada (ATR) en un equipo modelo FT-IR Nicolet iS 50 marca Thermo Corporation acoplado a un accesorio ATR de diamante modelo GladiATR marca Pike Technologies. Los espectros de las muestras fueron adquiridos a través de 100 barridos a una resolución de 4 cm^{-1} en el rango de longitud de onda de 4000 a 400 cm^{-1} . Adicionalmente, se adquirió el espectrograma de fondo del cristal de diamante para la corrección de los espectrogramas de las muestras. Los espectrogramas fueron corregidos con base en los ajustes recomendados por el fabricante para el adaptador ATR y los espectros resultantes se suavizaron mediante el uso de la función Savitzky-Golay, ambos ajustes se realizaron en el programa OMNIC 9.0. Una vez corregidos los espectros fueron importados al programa Origin 8.5 donde se realizó la corrección de la línea base para corregir la deriva de los espectros (Ibarra-Arazave et al., 2019). Una vez procesados los espectrogramas se realizó la asignación de las bandas observada a compuestos específicos con base en las asignaciones publicadas (Artz et al., 2008; El Fels et al., 2014; Nandiayato et al., 2019; Bekiaris et al., 2020; Tabla 1).

Tabla 1. Asociación entre moléculas y bandas empleadas para la interpretación de los espectrogramas derivados del análisis de ATR-FTIR.

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Enlace	Molécula asociada	Referencia
1200-900	C-O	Carbohidratos	Nandiyato et al., 2019; Bekiaris et al., 2020
1230-1238	C-N; PO ₂ ⁻	Amida III (Proteína); Ácidos nucleicos	Nandiyato et al., 2019
1380-1350	N-H	Ión nitrato	Nandiyato et al., 2019
1510	-	Lignina	Bekiaris et al., 2020
1600-1650	C=C	Comp. aromáticos	Artz et al., 2008; El Fels et al., 2014
1630	C=O; C=N; N-H	Proteínas (Amida I, II)	Nandiyato et al., 2010
2950-2800	C-H	Lípidos	Nandiyato et al., 2019; Bekiaris et al., 2020
3340	O-H; N-H	Celulosa	Artz et al., 2008
3640-3530	O-H	Fenoles	Nandiyato et al., 2019

4.3.3. Análisis de actividad biológica

4.3.3.1. Mineralización potencial de carbono

Se colocaron 50 g de suelo fresco en tubos de cloruro de polivinilo (PVC, por sus siglas en inglés) con malla de poliéster en uno de sus extremos para evitar la pérdida de material y se hidrataron por capilaridad hasta llegar a capacidad de campo; posteriormente se colocaron en frascos de vidrio de boca ancha junto con viales con NaOH 1N y se sellaron herméticamente para incubarlos a 25°C en oscuridad durante 18 días. Los viales se sustituyeron a los 3, 9 y 18 días, el contenido de los viales cosechados se transfirió a un vaso donde se les añadió 5 mL BaCl₂ 1.5 N para precipitar como BaCO₃ el CO₂ atrapado en la trampa de NaOH derivado del proceso de respiración de los microorganismos del suelo. El NaOH residual se tituló con HCl 1N y fenolftaleína como indicador. Se utilizaron cinco blancos en el ensayo para asegurar que no existiera contaminación por agentes externos.

4.3.3.2. Actividad enzimática

Se determinó la actividad enzimática de deshidrogenasa (DES), polifenol oxidasa (POX), β-glucosidasa (BGL), *N*-acetilglucoaminidasa (NAG) y lipasa (LIP) en butirato de acuerdo con la metodología reportada por Chávez-Vergara y colaboradores (2014; 2018). Previo a la determinación de la actividad enzimática, se determinó el pH en agua y el contenido de humedad de cada muestra (métodos antes descritos) para tener las consideraciones adecuadas para preparación de reactivos y cálculo de concentraciones finales. Para la determinación de la actividad se BGL, NAG y LIP se emplearon sustratos unidos a *p*-nitrofenol lo cual es lo más empleado para la determinación de la actividad de hidrolasas (Luo et al., 2017) mientras que para la determinación de POX se cuantificó mediante la oxidación 2-2-azino-bis (ácido 3-ethylbenzthiazoline-6-sulfónico) (ABTS; Folch et al., 2007).

Para la determinación de la actividad de todas las enzimas, excepto DHG, se pesaron 2 g de suelo fresco (evitando incluir rocas y raíces) en tubos cónicos de 50 mL de capacidad, a los cuales se les adicionaron 30 mL de Modified Universal Buffer 1x (MUB 1x) ajustado al pH particular de cada sitio y se agitaron de manera horizontal a

temperatura ambiente por 15 minutos a 120 rpm. Una vez terminada la agitación, se tomaron 670 μ L del extracto y se transfirieron a tubos de microcentrífuga junto con 670 μ L del sustrato para la enzima a determinar, esto se realizó por triplicado. También se hizo un control de muestra a partir de 670 μ L de extracto suelo-MUX 1x y 670 μ L de MUB 1x y tres controles de sustrato por ensayo preparados con 670 μ L del sustrato del ensayo y 670 μ L de MUB 1x. Todos los tubos de microcentrífuga se incubaron en agitación (120 rpm) a 25 °C por 2 h. Una vez cumplido el tiempo de incubación se colocaron en una centrífuga refrigerada marca CENTURION a 4°C y 10,000 rpm durante dos minutos, se tomaron 750 μ L del sobrenadante y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL junto con 3 mL de agua Milli Q y 0.75 μ L de hidróxido de sodio (NaOH) 1N con el fin de detener la liberación de *p*-nitrofenol y generar color (amarillo), las muestras se homogeneizaron en un agitador tipo vortex.

La cuantificación de la actividad se hizo mediante espectrofotometría a 410 nm de longitud de onda y se calibró a cero con MUB 1x, realizando la lectura por triplicado para cada muestra para las hidrolasas. En el caso de POX el ensayo se realizó después de la incubación y la centrifugación sin adicionar agua Milli Q y NaOH 1N; la actividad de esta enzima se realizó con el espectrofotómetro calibrado a 460 nm de longitud de onda. La determinación de la DESH está basada en la cuantificación del cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC) que se reduce a rojo de trifeniltetrazolio formazan (TPF). Se colocó 1 g de suelo fresco en tubos cónicos de color negro de 15 mL y se adicionó 1 mL de solución de TTC-TRIS-HCl 1% pH 7.8 y tres controles de TRIS-HCl, se incubaron en agitación vertical (180 rpm) a 25°C durante 24 h. Una vez terminada la incubación se adicionaron 8 mL de acetona y se agitaron por 2 h a 180 rpm y posteriormente se centrifugaron a 6000 rpm a 4°C durante 5 min. Las muestras se filtraron a través de papel filtro Whatman no. 1 bajo luz difusa y se recuperaron en tubos negros para evitar la fotodegradación. La concentración de TTC se cuantificó por espectrofotometría a 546 nm, llevado a cero con acetona.

4.3.3.3. Actividad enzimática específica (AEE) y Coeficiente metabólico (qCO₂)

La actividad enzimática específica (AEE) se calculó para ponderar la actividad enzimática de cada sitio de acuerdo con el tamaño de la biomasa microbiana presente mientras que el coeficiente metabólico (qCO₂) pondera la producción de CO₂ a lo largo de la incubación con base en la biomasa microbiana inicial.

$$\text{El cálculo realizado para la AEE fue: } AEE = \frac{AE}{Cmic}$$

donde **AE** es la actividad enzimática absoluta de los ensayos realizados para cada enzima y **Cmic** es el carbono contenido en la biomasa microbiana.

$$\text{El cálculo para el } qCO_2 \text{ fue: } qCO_2 = \frac{CO_2}{Cmic}$$

donde **CO₂** es el CO₂ total respirado por la comunidad microbiana en incubación a 25 °C durante 18 días y **Cmic** es el carbono contenido en la biomasa microbiana.

4.4. Análisis estadístico

A los datos derivados de los análisis de laboratorio se les realizó un análisis de normalidad con una prueba de Shapiro-Wilk, a los datos que presentaron normalidad se les realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y a los datos que presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) se les aplicó prueba post-hoc Tukey HSD con StatSoft STATISTICA Versión 10.0.228.8. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables individuales al interior de cada condición para la cual se estableció $p \leq 0.05$ como límite de significancia; Así también, se realizó un Análisis Discriminante Linear (ADL) con y sin validación cruzada para observar la probabilidad de pertenencia a los tratamientos para el cual se normalizaron los datos con una transformación logarítmica base 10 y un escalamiento de los valores, ambos análisis en se realizaron en el programa R v.4.0.3 (R Core Team, 2020).

5. Resultados

5.1. Descripción de Suelos en campo

5.1.1. Sitio con producción de caña de azúcar (CA)

Este perfil de suelo se describió previamente por Cabrera-Vázquez (2019). El perfil fue ubicado en una parcela productiva de caña de azúcar con manejo intensivo, la cual presenta una pendiente de 8%. La clasificación propuesta para el suelo de este sitio fue: Antrosol Tétrico Esquelético de acuerdo con la WRB (2015). Los horizontes identificados y descritos para el perfil de suelo (Fig. 5a) fueron:

Ap. 0 – 15/20 cm de profundidad con color pardo en seco 10YR 4/3 y negro en húmedo 10YR 2/1. La estructura fue en bloques angulares y subangulares que rompen a granular. Los agregados se clasificaron como muy duros y compactos con la presencia de fragmentos de tamaño medio de carbón y rocas. Sin reacción al HCl.

A. 15/20 – 60 cm de profundidad con color pardo en seco 10YR 4/3 y negro en húmedo 10YR 2/1 con un patrón moteado oscuro sobre los agregados (posiblemente asociado a MO). La estructura fue en bloques subangulares de consistencia dura. Se observó la presencia de abundantes fragmentos de carbón y rocas. Sin reacción al HCl.

2AB. 60 - 90 cm de profundidad con un color pardo en seco 10YR 5/3 y pardo muy oscuro en húmedo 10YR 2/2. Presentó una estructura en bloques subangulares de tamaño pequeño, frágiles que rompen a gránulos. Se observó recubrimiento de MO sobre los agregados y sin reacción al HCl.

2Bti. 90 - 100 cm de profundidad con un color marrón en seco 10YR 5/3 y marrón muy oscuro en húmedo 10YR 2/2 y una estructura en bloques angulares de tamaño medio los cuales presentaron rasgos vérticos. Sin reacción al HCl.

5.1.2. Sitio con un cafetal recién establecido (CR)

La calicata se realizó en una parcela cuyo terreno presenta una pendiente $\leq 2\%$ y la cual está manejada mediante el establecimiento reciente de cafetos juveniles cuyo manejo previo fue de producción de caña de azúcar y posterior descanso. La clasificación propuesta para el suelo de este sitio de acuerdo con la WRB (2015) fue: Ferralsol Úmbrico Endostágnico. Los horizontes encontrados y descritos para el perfil de suelo (Fig. 5b) fueron:

Ap1. 0 - 20 cm de profundidad con un color marrón oscuro en seco 10YR 3/3 y un color marrón amarillento oscuro en húmedo 10YR 3/4. La estructura presente fue en bloques subangulares que rompen a granular. Los poros presentes fueron de tamaño medio y finos de forma tubular y vesicular. La textura al tacto fue arcillosa. Se observaron abundantes fragmentos de carbón y raíces finas y gruesas, así como de actividad de micro y meso fauna (hormigas y lombrices). El límite con el horizonte subyacente fue difuso. Sin reacción al HCl.

Ap2. 20 – 30 cm de profundidad. Las características presentes fueron muy similares a su horizonte suprayacente con un color marrón oscuro en seco 10YR 3/3 y un color marrón amarillento oscuro en húmedo 10YR 3/6, pero con una densidad menor de poros y con un límite ondulado con el horizonte subyacente. Sin reacción al HCl.

Bw. 30 – 62 cm de profundidad con un color marrón fuerte en seco 7.5YR 4/6 y un marrón oscuro en húmedo 7.5YR 3/4 con motas amarillentas y fragmentos carbón. Su estructura fue en bloques angulares y rasgos de compactación. Se observó evidencia de micro y mesofauna con canales pertenecientes a raíces descompuestas y rellenos de material mineral. La textura al tacto fue limo-arcillosa. El límite con el horizonte subyacente fue difuso. Sin reacción al HCl.

Bgi. 62 - 90 cm de profundidad con un color marrón en seco 7.5YR 4/4 y marrón oscuro en húmedo 7.5YR 3/4 con presencia de motas grises, correspondientes a condiciones estagnicas. Su estructura fue en bloques angulares que presentaban superficies de deslizamiento características de condiciones vérticas. La porosidad presentó baja densidad con poros de tamaño pequeño. Sin reacción al HCl.

5.1.3. Sitio con un cafetal maduro

La calicata se realizó en una parcela cuyo terreno presenta una pendiente ligera ($\leq 9\%$), la cual presenta cafetos maduros y productivos, este sitio previamente fue manejado para la producción de caña de azúcar. La clasificación propuesta para el suelo de este sitio de acuerdo con la WRB (2015) fue: Ferralsol Colúvico Endostagnico. Los horizontes encontrados y descritos para el perfil de suelo fueron (Fig. 5c):

Ap1. 0 – 10 cm de profundidad con un color marrón oscuro en seco 7.5YR 3/4 y marrón muy oscuro en húmedo 7.5YR 2.5/2. Se observó una capa de material vegetal en

descomposición y plantas herbáceas con raíces de tamaño finos y medios. La estructura presente fue granular muy estable con textura arcillosa al tacto. Sin reacción al HCl.

Ap2 de 10 – 22 cm de profundidad con un color marrón oscuro en seco 10YR 3/3 y marrón muy oscuro en húmedo 10YR 2/2 con manchones rojizos. La estructura fue en bloques subangulares poco estables que rompen a gránulos muy estables. La textura al tacto fue arcillosa. Se encontraron fragmentos de carbón de tamaño pequeño y se observaron raíces finas y medias. Sin reacción al HCl.

ABi. 22 – 40 cm de profundidad con un color marrón oscuro en seco 7.5YR 3/4 y marrón muy oscuro en húmedo 7.5YR 2.5/2 con presencia de motas rojizas. La estructura fue en bloques angulares con cutanes de estrés correspondientes a las propiedades vérticas. La textura al tacto fue arcillosa. Se observaron fragmentos de tamaño medio a grandes de carbón y raíces finas y medias. Sin reacción al HCl.

2AB. 40 – 60 cm de profundidad con un color marrón amarillento oscuro en seco 10YR 4/4 y marrón oscuro en húmedo 10YR 3/3. Su estructura fue en bloques angulares y subangulares muy frágiles, con textura arcillosa al tacto; el límite inferior del horizonte presentó compactación en algunas zonas en las cuales se observó menor densidad de poros en contraste con el resto. Se observaron fragmentos de carbón, obsidiana trabajada y pómez. Disminuyó la cantidad de raíces finas, medias y gruesas. Sin reacción al HCl.

2Bw. 60 – 70 cm de profundidad con un color marrón amarillento en seco 10YR 6/6 y marrón amarillento oscuro en húmedo 10YR 4/6. La estructura fue en bloques angulares y subangulares con una textura principalmente arcillosa con fracciones importantes de arenas y limos además de partículas de tamaño de grava. Presencia de fragmentos de carbón y raíces finas, así como una crotovina. Sin reacción al HCl.

2Bct. 75 – 100 cm de profundidad con un color marrón amarillento 10YR 6/6 y marrón amarillento oscuro 10 YR 6/6 con motas grises que suponen ser saprolita. La estructura fue en bloques angulares y subangulares con una textura arcillo-arenosa. Se observaron fragmentos de carbón con un bajo contenido de raíces gruesas y medias y evidencia de bioturbación. Se observaron cutanes de iluviación de arcillas. Sin reacción al HCl.

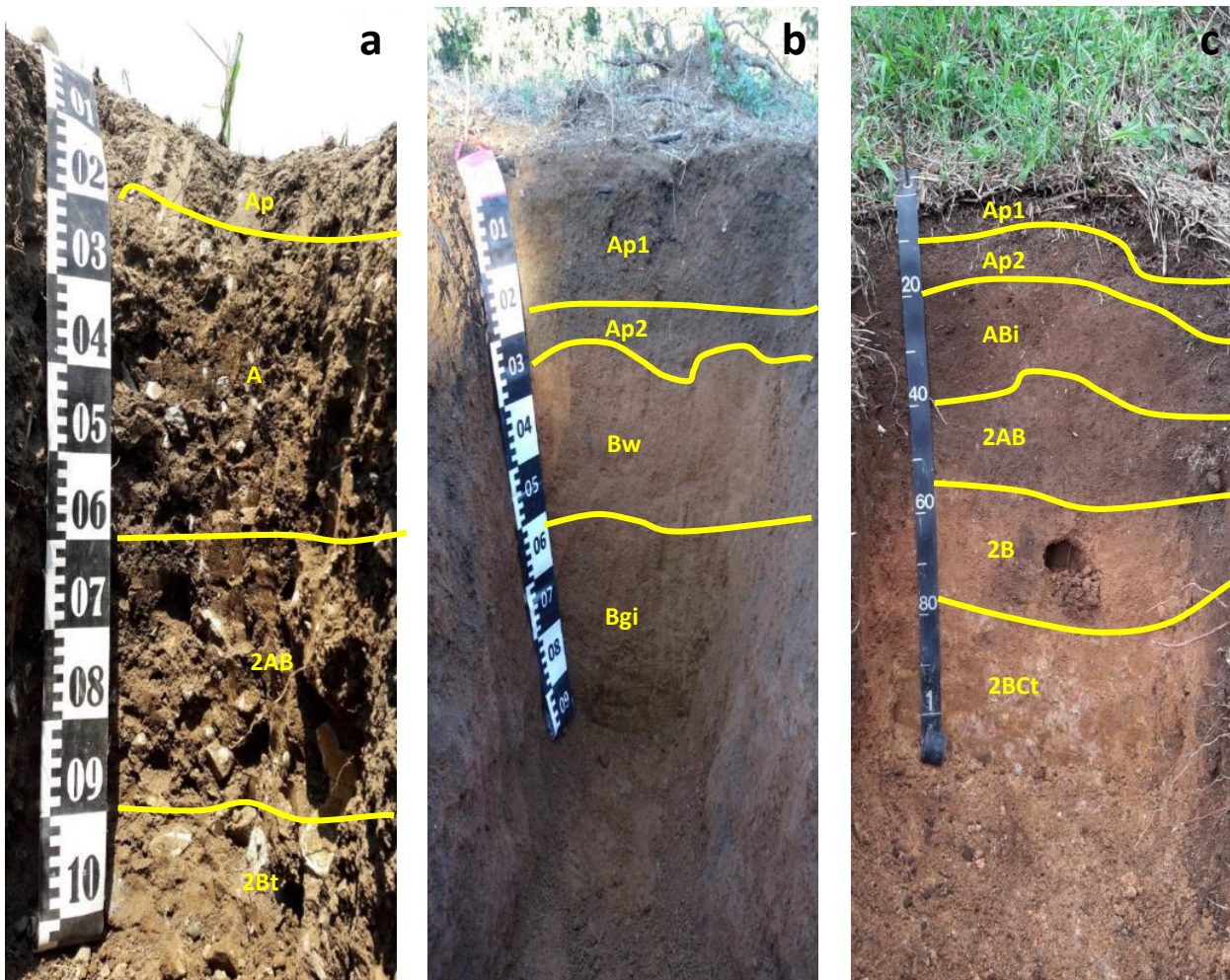


Figura 5. Perfiles de suelo en las condiciones evaluadas. En líneas y letras amarillas se muestra el límite entre horizontes y la nomenclatura para designar a cada uno de ellos. a) Caña de azúcar; b) Cafetal recién establecido; c) Cafetal maduro productivo.

5.2. Análisis físicos

5.2.1. Contenido de humedad, densidad aparente y textura

El contenido de humedad de los suelos osciló entre 29.3% y 25.8%, sin que se presentaran diferencias significativas entre condiciones (Tabla 2). De forma similar, la densidad aparente no presentó diferencias significativas entre condiciones (Fig. 6), aunque la densidad aparente presentó valores $>1 \text{ g cm}^{-3}$ en CA.

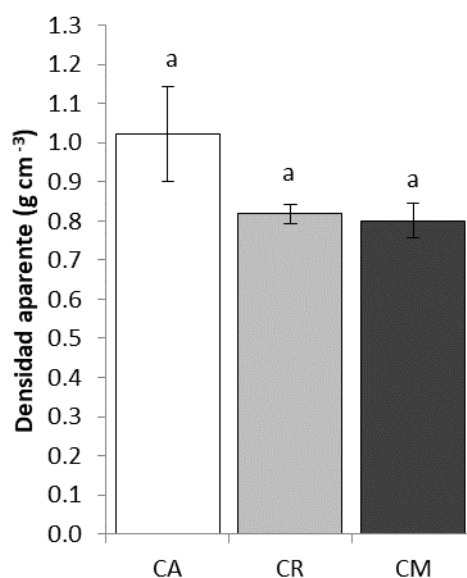


Figura 6. Densidad a aparente del suelo superficial de las condiciones evaluadas. Se muestran los valores promedio de densidad \pm error estándar. CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

La distribución del tamaño de partículas en los suelos superficiales de las condiciones estudiadas mostró la menor proporción de arcillas en la condición CA (fig. 7a). Sin embargo, las muestras superficiales de los tres sitios se ubican en la misma clase textural, correspondiente a los suelos de tipo arcilloso, como se puede observar en el triángulo textural (fig. 7b).

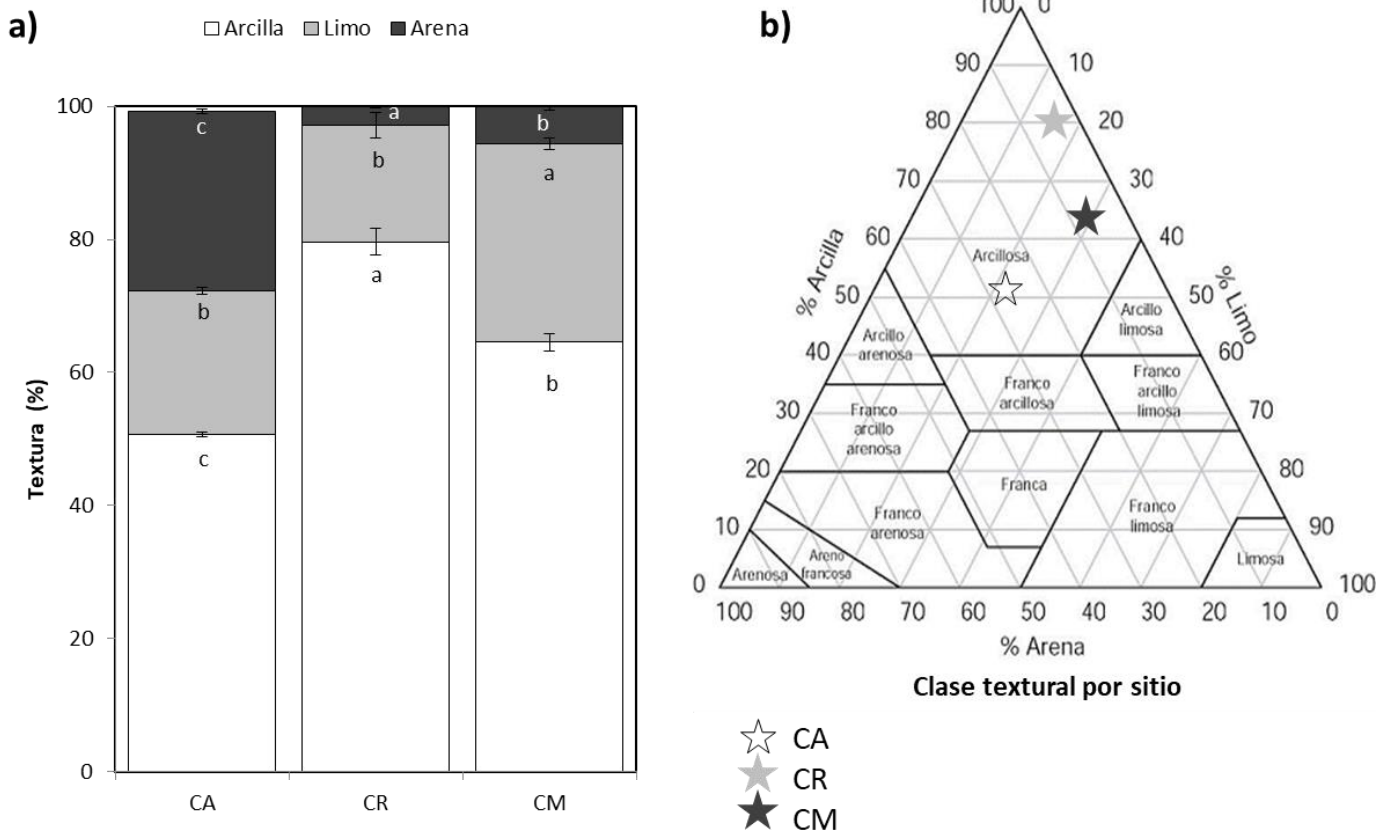


Figura 7. Textura del suelo superficial por condición. a) Textura por condición, las barras apiladas representan el porcentaje de cada tamaño de partícula presente por sitio. b) Clasificación textural por condición. CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

Tabla 2. Tabla de ANOVA para datos de parámetros físicos. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F (p)
Contenido de humedad (%)	29.3 \pm 2.70 ^a	27.0 \pm 0.89 ^a	25.8 \pm 1.7 ^a	0.8 (0.45)
Densidad aparente (g cm⁻³)	1.02 \pm 0.12 ^a	0.82 \pm 0.02 ^a	0.80 \pm 0.04 ^a	2.5 (0.11)
Contenido de arena (%)	27 \pm 0.45 ^a	2.86 \pm 0.19 ^c	5.67 \pm 0.54 ^b	1220.02 (<0.01)
Contenido de limo (%)	21.67 \pm 0.68 ^b	17.48 \pm 1.90 ^b	29.79 \pm 0.87 ^a	26.09 (<0.01)
Contenido de arcilla (%)	50.67 \pm 0.52 ^c	79.66 \pm 2.07 ^a	64.54 \pm 1.34 ^b	73.93 (<0.01)

5.3. Análisis químicos

5.3.1. pH y capacidad buffer

Los valores de pH en agua (pH potencial) son ligeramente ácidos en todos los casos; sin embargo, presentan diferencias significativas entre sitios (Fig. 8a), debido a que en el sistema de producción de caña de azúcar (CA) se presenta el valor más alto respecto a las otras condiciones. Para los valores de pH en cloruro de calcio (CaCl₂) se observa la misma tendencia de comportamiento que el pH medido en agua (fig. 8a). El cálculo de la capacidad buffer del suelo (Fig. 8b) no presentó diferencias significativas entre tratamientos; aunque el sitio CR presentó un valor de capacidad buffer de suelo 15.4% menor que CA y CM.

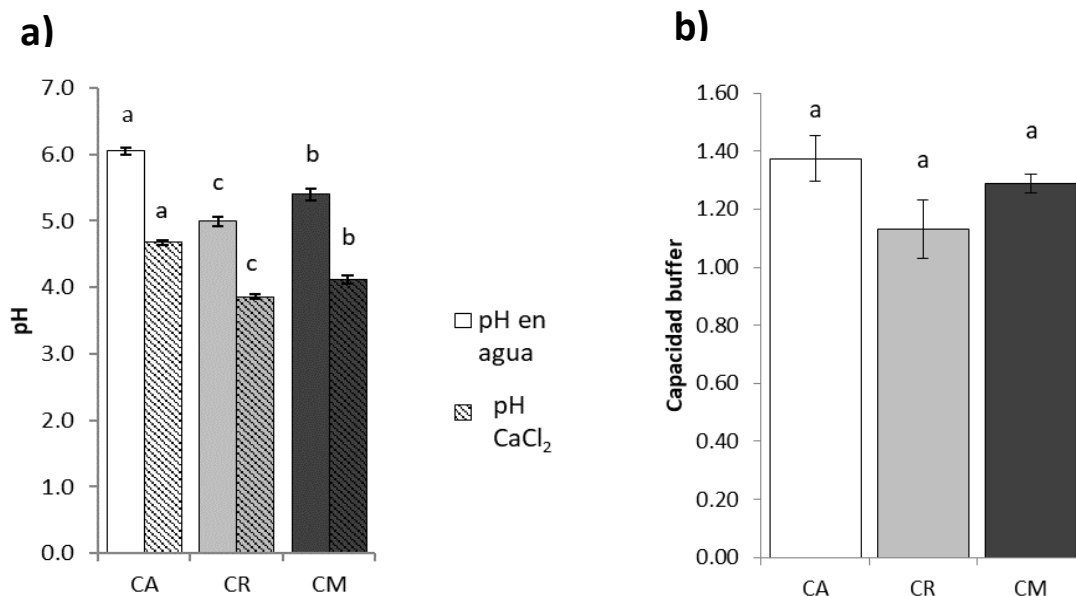


Figura 8. pH y Capacidad buffer en el suelo de las condiciones de estudio. Se muestran los valores promedio de mediciones por condición \pm error estándar de pH en agua y pH en CaCl₂ (a) y Capacidad buffer (b). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

5.3.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Cationes intercambiables (CI) y % de Saturación de Bases (SB)

La capacidad de intercambio catiónico no presentó diferencias significativas entre tratamientos (fig. 9a). Mientras que la concentración de los iones intercambiables mostró diferencias entre las condiciones, la concentración de Ca²⁺ y de Mg²⁺ presentaron el mismo patrón donde en CA hubo la mayor concentración seguido de CM y CR el menor valor (fig. 9b y 9c) mientras que la concentración de K⁺ mostró el siguiente patrón CA>CR>CM (fig. 9d). La saturación de bases mostró diferencias significativas entre las condiciones, ya que en CA y en CR se presentaron los valores mayores y menores, respectivamente (fig. 8e).

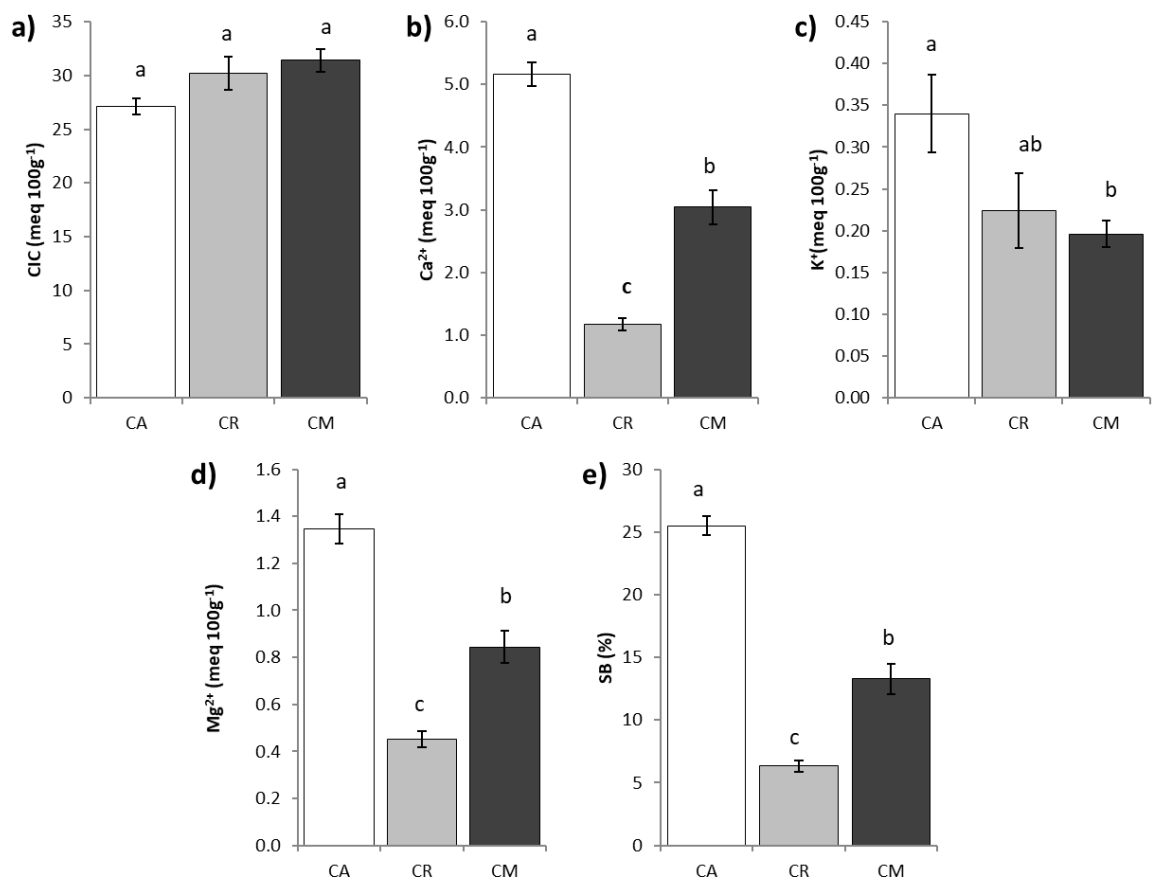


Figura 9. CIC, SB y cationes intercambiables del suelo por condición. Se presentan los valores promedio \pm error estándar de la capacidad de intercambio catiónico (a), calcio intercambiable (b), potasio intercambiable (c), magnesio intercambiable (d) y saturación de bases (d). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

Tabla 3. Tabla de ANOVA para datos de parámetros químicos. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F (p)
pH y capacidad de amortiguamiento				
pH Activo	6.0 \pm 0.05 ^a	5.00 \pm 0.08 ^c	5.4 \pm 0.09 ^b	53.4 (<0.01)
pH Potencial	4.7 \pm 0.04 ^a	3.9 \pm 0.03 ^c	4.1 \pm 0.06 ^b	95.6 (<0.01)
Capacidad buffer	1.3 \pm 0.08 ^a	1.1 \pm 0.10 ^a	1.3 \pm 0.03 ^a	2.6 (0.11)
Capacidad de Intercambio catiónico y bases intercambiables				
CIC (meq 100g⁻¹)	27.1 \pm 0.76 ^a	30.2 \pm 1.56 ^a	31.4 \pm 1.05 ^a	3.5 (0.06)
SB (%)	25.5 \pm 0.76 ^a	6.32 \pm 0.48 ^c	13.3 \pm 1.24 ^b	119 (<0.01)
Ca²⁺ (meq 100g⁻¹)	5.16 \pm 0.19 ^a	1.17 \pm 0.10 ^c	3.04 \pm 0.27 ^b	99.1 (<0.01)
Mg²⁺ (meq 100g⁻¹)	1.35 \pm 0.06 ^a	0.45 \pm 0.03 ^c	0.84 \pm 0.07 ^b	62.4 (<0.01)
K⁺ (meq 100g⁻¹)	0.34 \pm 0.05 ^a	0.22 \pm 0.04 ^a	0.20 \pm 0.02 ^b	3.9 (0.01)

5.3.3. Concentración de COT y Nt, relación estequiométrica (COT:Nt) y contenido de COT y Nt

La concentración de COT no presentó diferencias significativas entre las condiciones estudiadas, aun cuando en CM, la concentración promedio de COT fue 20% mayor respecto a la condición CA (Fig. 10a; Tabla 4). La concentración de Nt mostró diferencias significativas entre las condiciones una vez que CM mostró una mayor concentración (50%) respecto a CA (Fig. 10b). En la relación COT:Nt se mostraron diferencias entre las condiciones evaluadas ya que CA mostró el valor más alto, el cual fue diferente sólo de CM (Fig. 11). En cuanto al contenido de COT y Nt calculado a 10 cm de profundidad no presentaron diferencias significativas (Fig. 12).

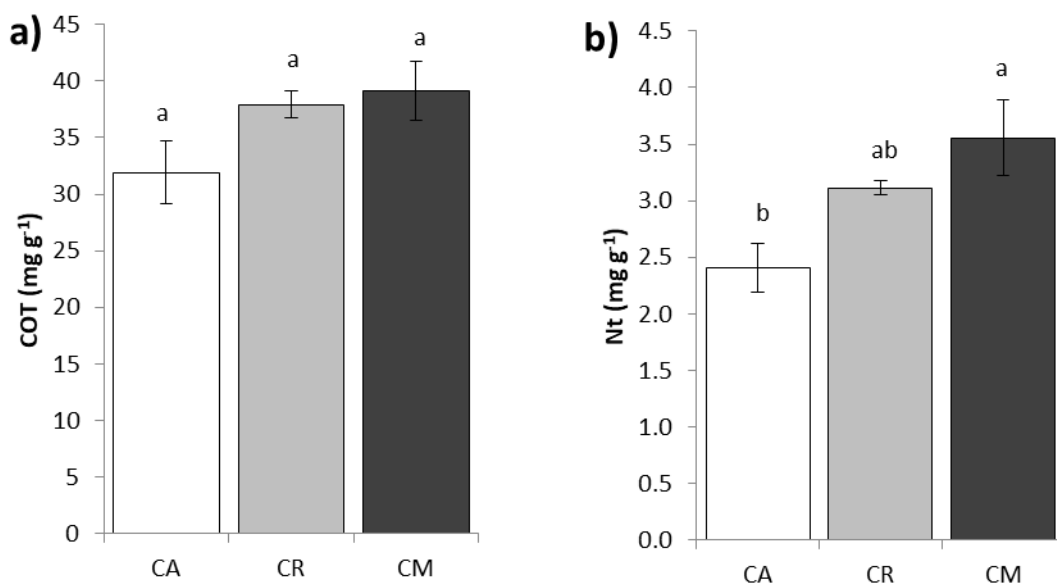


Figura 10. COT y Nt en el suelo en las condiciones evaluadas. Se presentan los valores promedio \pm error estándar de la concentración de carbono orgánico total (a) y nitrógeno total (b). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

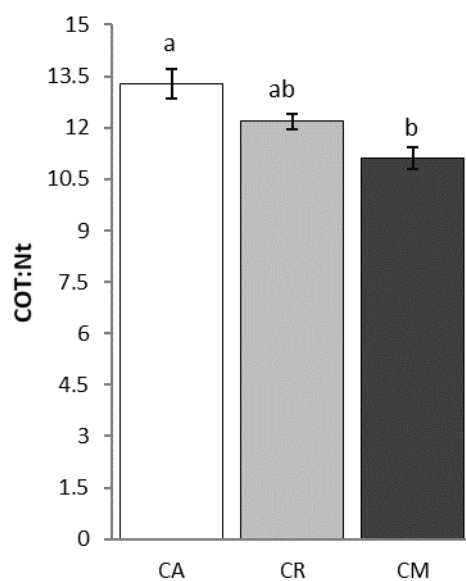


Figura 11. Relación COT:Nt por condición evaluada. Se presentan los valores promedio de relación COT:Nt totales \pm error estándar. CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

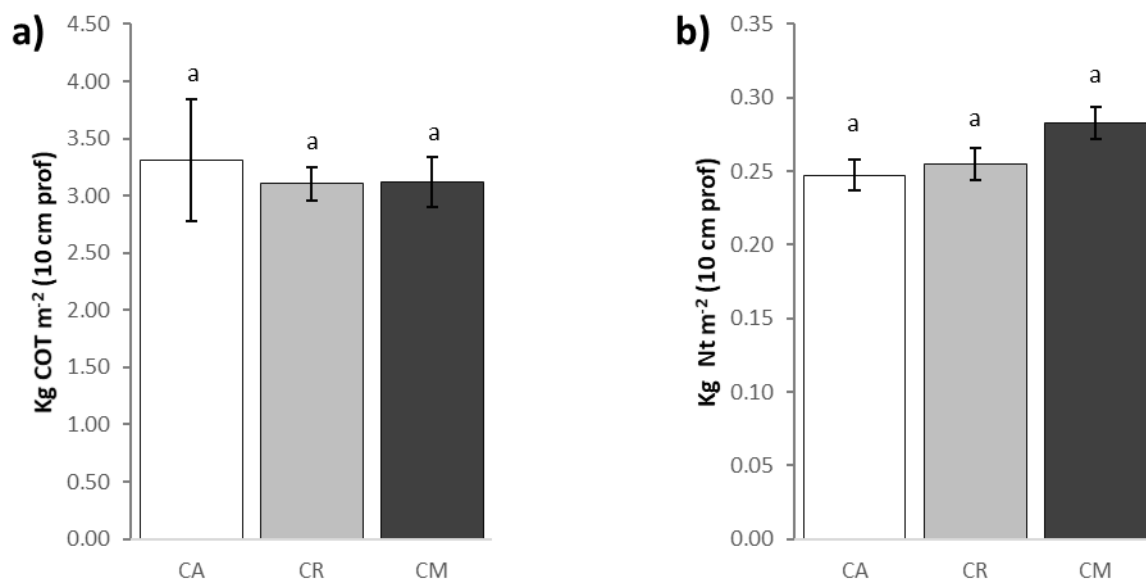


Figura 12. Contenido de COT y Nt en el suelo por condición evaluada. Se presentan los valores promedio \pm error estándar del contenido COT (a) y Nt (b). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

Tabla 4. Tabla de ANOVA para COT y Nt. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F (p)
Concentración y contenido de C y N				
COT (mg g⁻¹)	31.9 \pm 2.78 ^a	37.9 \pm 1.18 ^a	39.1 \pm 2.63 ^a	2.7 (0.1)
Nt (mg g⁻¹)	2.41 \pm 0.21 ^b	3.11 \pm 0.06 ^a	3.56 \pm 0.33 ^a	6.3 (0.01)
COT (kg C m⁻²) *	3.31 \pm 0.53 ^a	3.10 \pm 0.14 ^a	3.12 \pm 0.21 ^a	0.1 (0.89)
Nt (kg N m⁻²) *	0.25 \pm 0.03 ^a	0.25 \pm 0.01 ^a	0.28 \pm 0.02 ^a	0.5(0.61)

* a 10 cm de profundidad

5.3.4. Nitrógeno (NH_4^+ y NO_3^-) disponible.

La concentración de amonio (NH_4^+) disponible fue significativamente mayor en el sitio CA que en las otras condiciones (Fig. 13a). Mientras que la concentración de nitrato (NO_3^-) presentó diferencias significativas entre los tres sitios, fue en CR donde se presentó la mayor concentración y en CA la menor concentración (Fig. 13b). La relación $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ resultó más alta en el sitio CA, reflejo del enriquecimiento del ion amonio (fig. 13c).

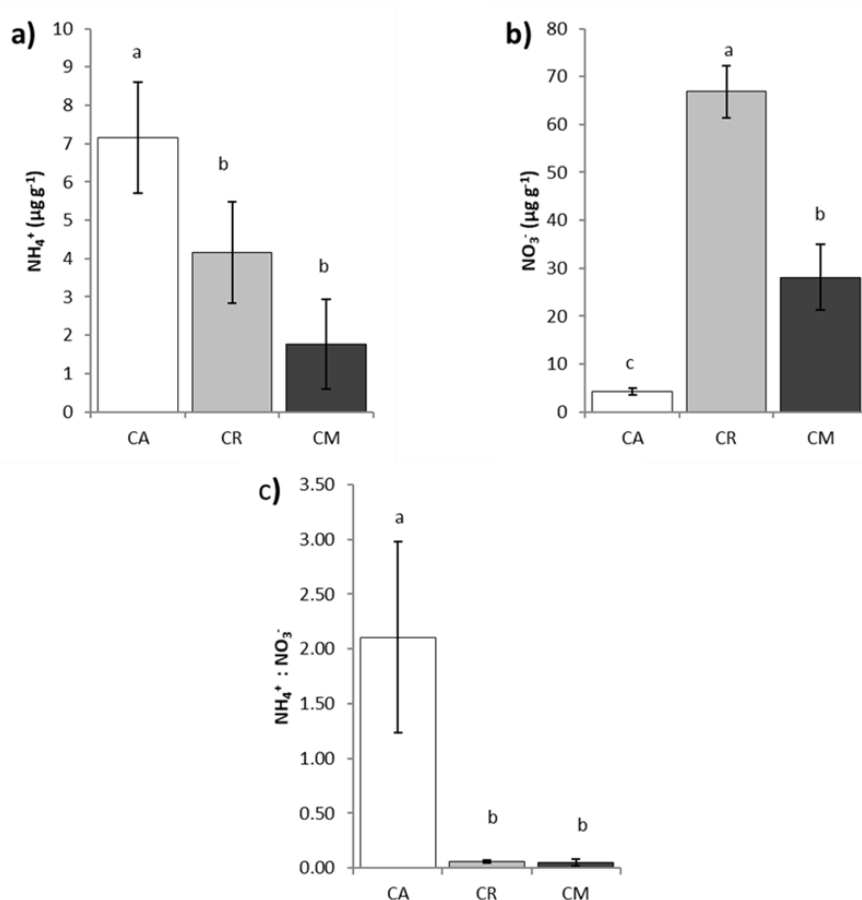


Figura 13. NH_4^+ , NO_3^- y cociente $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en el suelo por condición. Se presentan los valores promedio de formas de N disponible \pm error estándar de NH_4^+ (a) y NO_3^- (b) y el cociente $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (c). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

Tabla 5. Tabla de ANOVA para datos de formas disponibles de N. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F (p)
Nitrógeno disponible				
NH₄⁺ (μg g⁻¹)	7.16 ± 1.45 ^a	4.15 ± 1.32 ^{ab}	1.76 ± 1.18 ^b	4.2 (0.04)
NO₃⁻ (μg g⁻¹)	4.28 ± 0.65 ^c	66.9 ± 5.48 ^a	28.1 ± 6.87 ^b	38.5 (<0.01)
NH₄⁺: NO₃⁻	2.10 ± 0.9 ^a	0.06 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.03 ^b	5.5 (0.01)

5.3.5. Fraccionamiento por densidad de la materia orgánica del suelo

5.3.5.1. Masa del material y concentración de carbono orgánico

La masa de las fracciones, así como el contenido de C orgánico mostró diferencias significativas entre las condiciones estudiadas (Fig. 14). La masa de la fracción de materia orgánica particulada, no unida a minerales, fue mayor en CA respecto a las otras condiciones. En las fracciones unidas a minerales, la fracción gruesa (entre 2000 y 63 μm) se cuantificó la mayor masa en CA mientras que en la fracción fina (<63 μm) en esta misma condición (CA) presentó el menor valor, respecto a las otras condiciones en ambas fracciones (Fig. 14a).

La concentración de C orgánico en CA fue diferente en todas las fracciones respecto a las otras condiciones, en la fracción particulada fue mayor, mientras que en las fracciones unidas a minerales se observó la menor concentración (Fig. 14b, tabla 6).

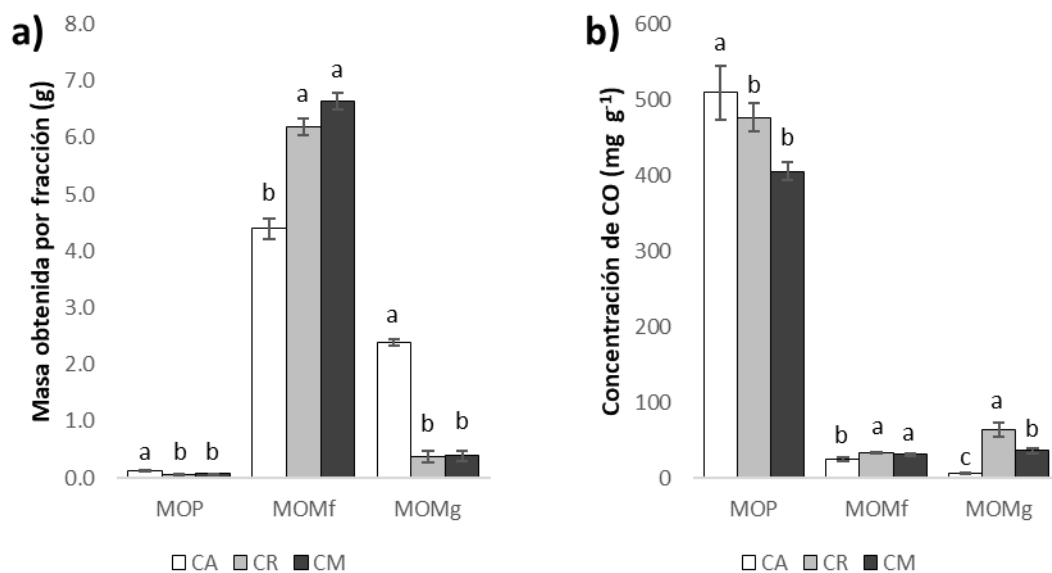


Figura 14. Masa de fracciones y concentración de CO por fracción obtenidas mediante fraccionamiento por densidad y tamaño de partícula. Se muestran los valores promedio \pm error estándar de la masa total de material obtenido por fracción (a) y la concentración de C orgánico por fracción (b). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro; MOP= materia orgánica particulada $<2 \text{ gml}^{-1}$; MOMf= materia orgánica unida a minerales $<63 \text{ }\mu\text{m}$; MOMg= materia orgánica unida a minerales $>63 \text{ }\mu\text{m}$; residual: $\% \text{COT} - \Sigma(\% \text{MOP}, \% \text{MOMf}, \% \text{MOMg})$. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

5.3.5.2. Distribución del C orgánico del suelo

La distribución de carbono en las diferentes fracciones obtenidas mediante el fraccionamiento por densidad mostró diferencias entre las condiciones evaluadas. De manera general, se recuperó más del 80% de masa en todas las condiciones (Fig. 15).

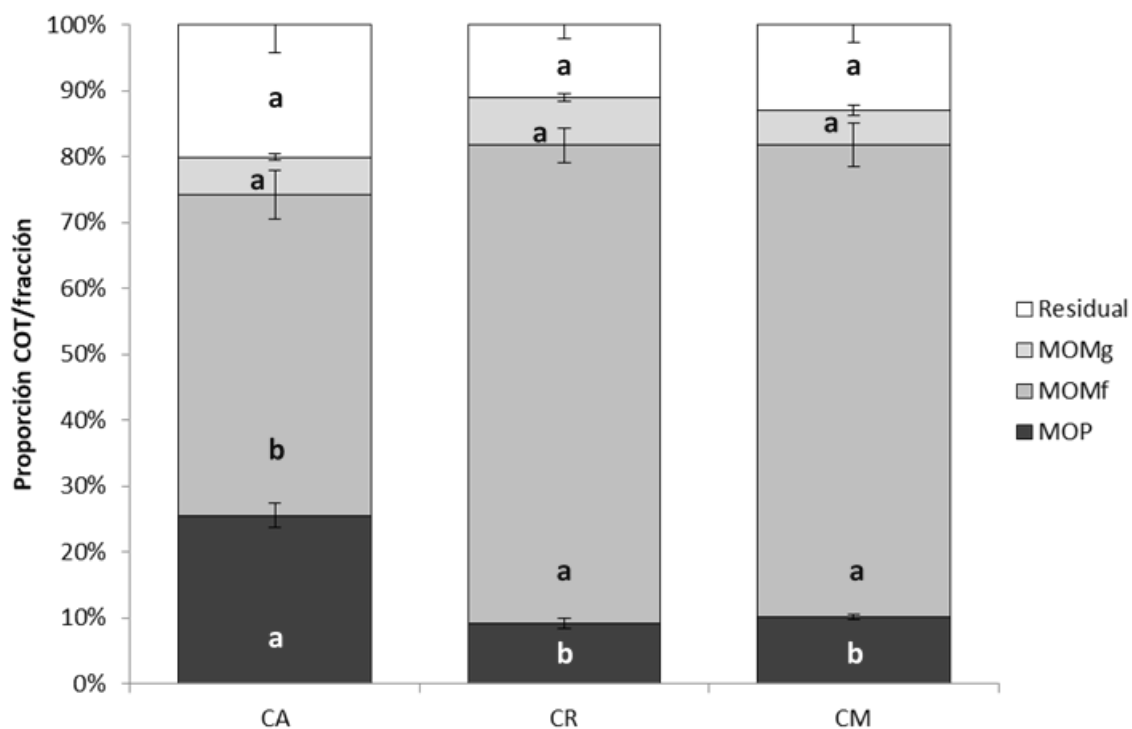


Figura 15. Distribución de CO en las fracciones del suelo. Se muestra la proporción de la masa de COT (g) por fracción obtenida mediante la separación por densidad. MOP= materia orgánica particulada $<2 \text{ gml}^{-1}$; MOMf= materia orgánica unida a minerales $<63 \text{ }\mu\text{m}$; MOMg= materia orgánica unida a minerales $>63 \text{ }\mu\text{m}$; residual: $\% \text{COT} - \Sigma(\% \text{MOP}, \% \text{MOMf}, \% \text{MOMg})$. Tratamientos CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

La fracción fina de C en forma de MOS que interactúa con los minerales del suelo ($<63 \text{ }\mu\text{m}$; MOMf) en las condiciones CR y CM se observa un 20% mayor a comparación de la presente en la condición CA, mientras que la fracción de COT gruesa que interactúa con las partículas minerales del suelo ($<2000 \text{ }\mu\text{m} - >63 \text{ }\mu\text{m}$; MOMg) tienen un porcentaje entre 5-7%. Para la fracción faltante a la cual corresponden otras formas de C (dinámicas o estables) no determinadas se observa la proporción en el orden $\text{CA} > \text{CR} > \text{CM}$ con 20.1, 13 y 11% respectivamente.

Tabla 6. Tabla de ANOVA para datos de distribución de CO en el suelo. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F (p)
Masa de fracciones (g)				
MOP	0.13 \pm 0.01 ^a	0.05 \pm 0.01 ^b	0.07 \pm 0.05 ^b	12.8 (<0.01)
MOMf	4.40 \pm 0.18 ^b	6.20 \pm 0.14 ^a	6.63 \pm 0.15 ^a	57.5 (<0.01)
MOMg	2.40 \pm 0.05 ^a	0.37 \pm 0.11 ^b	0.40 \pm 0.10 ^b	173.3 (<0.01)
Concentración de C en fracciones (mg g⁻¹)				
MOP	509 \pm 35.8 ^a	476 \pm 19.1 ^{ab}	405 \pm 12.1 ^b	4.7 (0.03)
MOMf	25.44 \pm 2.53 ^b	32.88 \pm 1.32 ^a	30.87 \pm 1.20 ^a	4.6 (0.03)
MOMg	5.44 \pm 0.60 ^c	63.31 \pm 8.95 ^a	36.14 \pm 3.30 ^b	27.5 (<0.01)
Distribución del COT entre fracciones (%)				
MOP	25.5 \pm 1.83 ^a	9.1 \pm 0.82 ^b	10.2 \pm 0.4 ^b	20.47 (<0.01)
MOMf	48.7 \pm 3.71 ^b	72.6 \pm 2.68 ^a	71.6 \pm 3.32 ^a	9.12 (<0.01)
MOMg	5.7 \pm 0.47 ^a	7.3 \pm 0.59 ^a	5.2 \pm 0.76 ^a	1.03 (0.4)
Residual	20.1 \pm 4.17 ^a	11 \pm 2.13 ^a	13 \pm 2.71 ^a	0.82 (0.4)

MOP: materia orgánica particulada (<2 g cm³), MOMf: materia orgánica unida a minerales <63 μ m, MOMg: materia orgánica unida a minerales >63 μ m, residual: %COT- Σ (%MOP, %MOMf, %MOMg).

5.3.5.3. Caracterización por ATR-FTIR de la materia orgánica particulada (MOP)

La caracterización de la fracción de MOP del suelo por medio de espectroscopía infrarroja muestra que la composición química de los compuestos orgánicos difiere notablemente en la intensidad de algunas bandas (Fig. 16). En el segmento del espectrograma entre los 900-1200 cm⁻¹, señales asociadas a polisacáridos, se observan dos picos bien definidos a 910 y 1053 cm⁻¹, una deformación en forma de hombro a 1035 y a 1110 cm⁻¹, en todos los casos relacionados con enlaces C-O (asociados principalmente a carbohidratos) y una señal en forma unimodal de amplia distribución y centrada a 3340 cm⁻¹ relacionada mayormente con la presencia de

celulosa. Aunque estas señales son coincidentes en las tres condiciones se observa la mayor intensidad en CR seguido de la condición CM y en CA, la menor intensidad (Fig. 16a y 16b).

Así también, en el espectrograma se pueden distinguir señales asociadas a compuestos nitrogenados; por ejemplo, en la banda en 1230 cm^{-1} se observa la presencia de enlaces C-N y del ion PO_2^- asociados principalmente a amidas terciarias (proteínas) y ácidos nucleicos; en 1370 cm^{-1} , señal indicativa del enlace N-H asociado al ion nitrato (NO_3^-), en la banda de los 1630 cm^{-1} perteneciente a enlaces dobles C-O, C-N y sencillo N-H asociados a amidas primarias y secundarias (proteínas), en todos los casos anteriores las señales son más intensas y mejor definidas en CR y CM mientras que en CA no están claramente definidas o son incipientes con respecto a las dos condiciones restantes (Fig. 15a).

La presencia de lípidos se observa en las bandas 2850 y 2912 cm^{-1} , ambas señales muy bien definidas en CR y CM, donde en la primera ambas son más prominentes mientras que en CA son muy incipientes (Fig. 16b). En cuanto compuestos aromáticos, se observa una incipiente señal unimodal atribuible a dobles enlaces C-C provenientes de compuestos aromáticos producto de quema de materiales orgánicos presente en 1600 cm^{-1} en CA, la cual no es observable en CR y CM; mientras que en la banda de 3620 cm^{-1} , asociado a enlaces O-H de compuestos fenólicos, se observa una señal bien definida en las tres condiciones cuya intensidad muestra el siguiente orden: $\text{CR} > \text{CM} > \text{CA}$ (Fig. 15b).

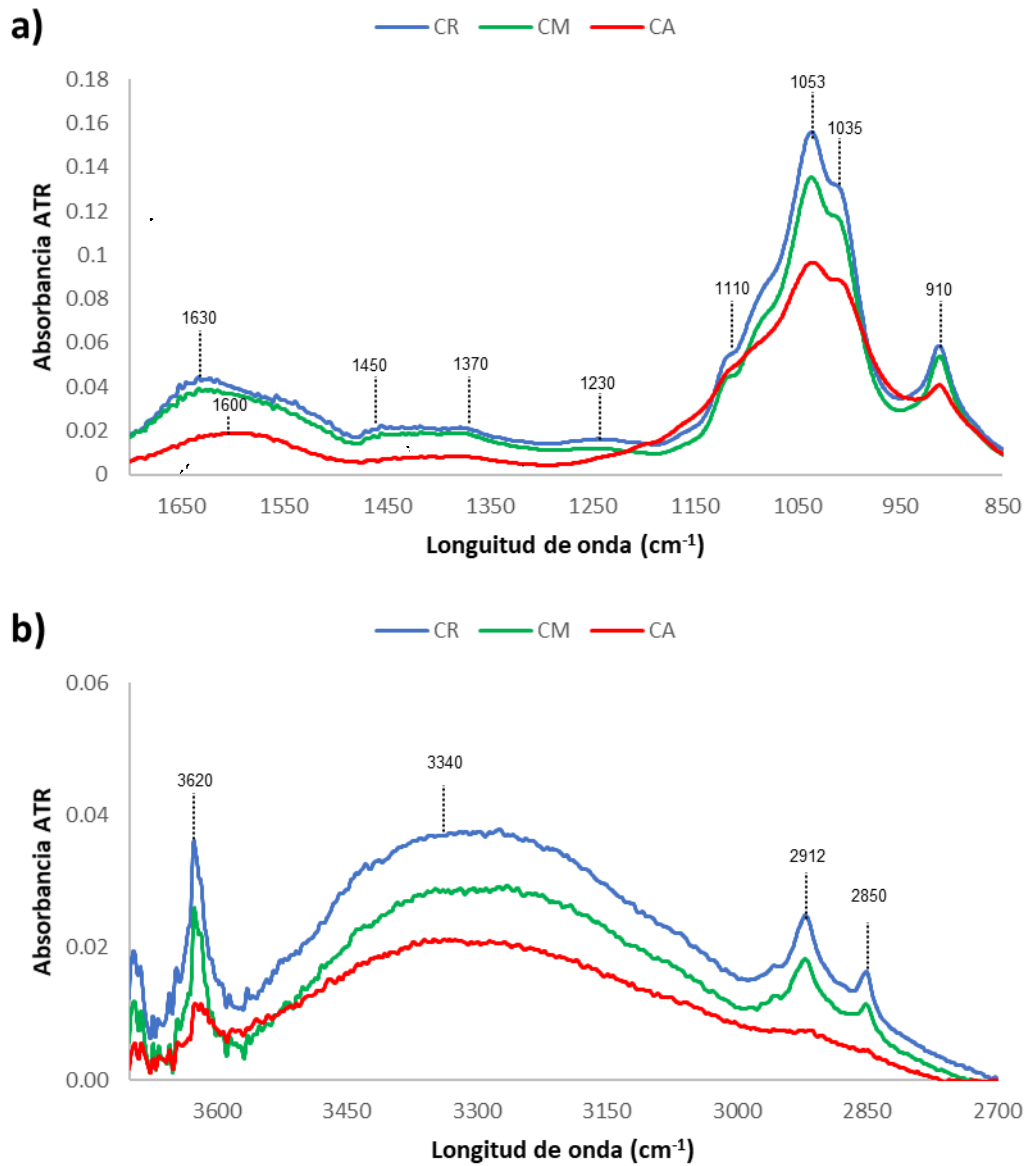


Figura 16. Espectrogramas de ATR-FTIR para la caracterización de la fracción de MOP. a) Espectro de $350\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$; b) Espectro de $2500\text{-}4150\text{ cm}^{-1}$ CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro.

5.4. Análisis Biológicos

5.4.1. Carbono (Cmic) y nitrógeno (Nmic) inmovilizados en biomasa microbiana

La condición de CA mostró la menor concentración de Cmic que fue sólo diferente de CM, el cual fue 4.5 veces mayor respecto a CA (Fig. 17a). La concentración de Nmic presentó la menor concentración en CA y la cual fue diferente de las otras condiciones, la cual es 2.5 y 4 veces mayor en CR y CM, respectivamente (Fig. 17b).

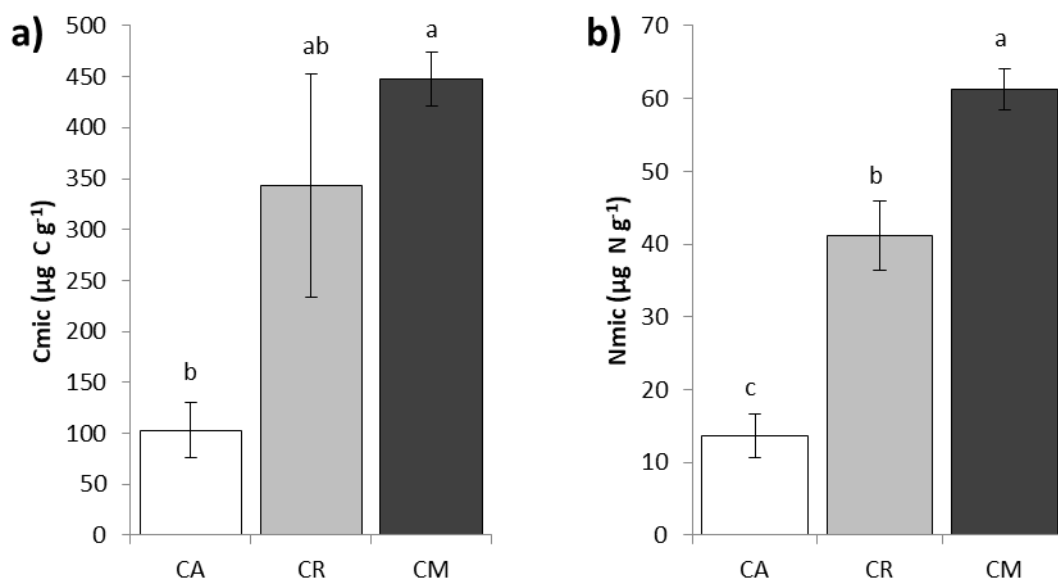


Figura 17. C y N inmovilizados en biomasa microbiana. Se muestran los valores promedio por \pm error estándar de carbono y nitrógeno microbianos (a y b respectivamente). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

Tabla 7. Tabla de ANOVA para datos de distribución de C y N inmovilizados en biomasa microbiana. Valores promedio por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras minúsculas diferentes refieren diferencias significativas con $p < 0.05$ en la prueba de Tukey HSD.

	CA	CR	CM	ANOVA F(p)
Inmovilización de C y N en biomasa microbiana ($\mu\text{g g}^{-1}$)				
Cmic	103.11 \pm 26.91 ^b	343.04 \pm 109.44 ^{ab}	447.79 \pm 26.18 ^a	6.7 (<0.01)
Nmic	13.90 \pm 3.02 ^c	41.1 \pm 4.72 ^b	61.2 \pm 2.82 ^a	43.4 (<0.01)
Cmic: Nmic	9.54 \pm 3.21 ^a	8.62 \pm 2.41 ^a	7.38 \pm 0.54 ^a	0.21 (0.81)

5.4.2. Actividad enzimática (AE) y actividad enzimática específica (AEE)

La actividad de la BGL (Fig. 18a, tabla 8) no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Se observa que para la actividad de la POX (Fig. 17b, tabla 6), el sitio CA presentó un valor 82 y 80% mayor que CM y CR, respectivamente. Contrario a esto, en los sitios CR y CM los valores de actividad de la LIP (Fig. 18c, tabla 8) fueron significativamente más altos en 70% respecto a CA. En el caso de actividad de la NAG sólo CR fue mayor y diferente a las otras dos condiciones (Fig. 18d). La actividad de la DES (Fig. 18e, tabla 8) presentó un comportamiento similar a POX en donde los valores del sitio CA son significativamente más altos que CR y CM en un 75 y 53%, respectivamente.

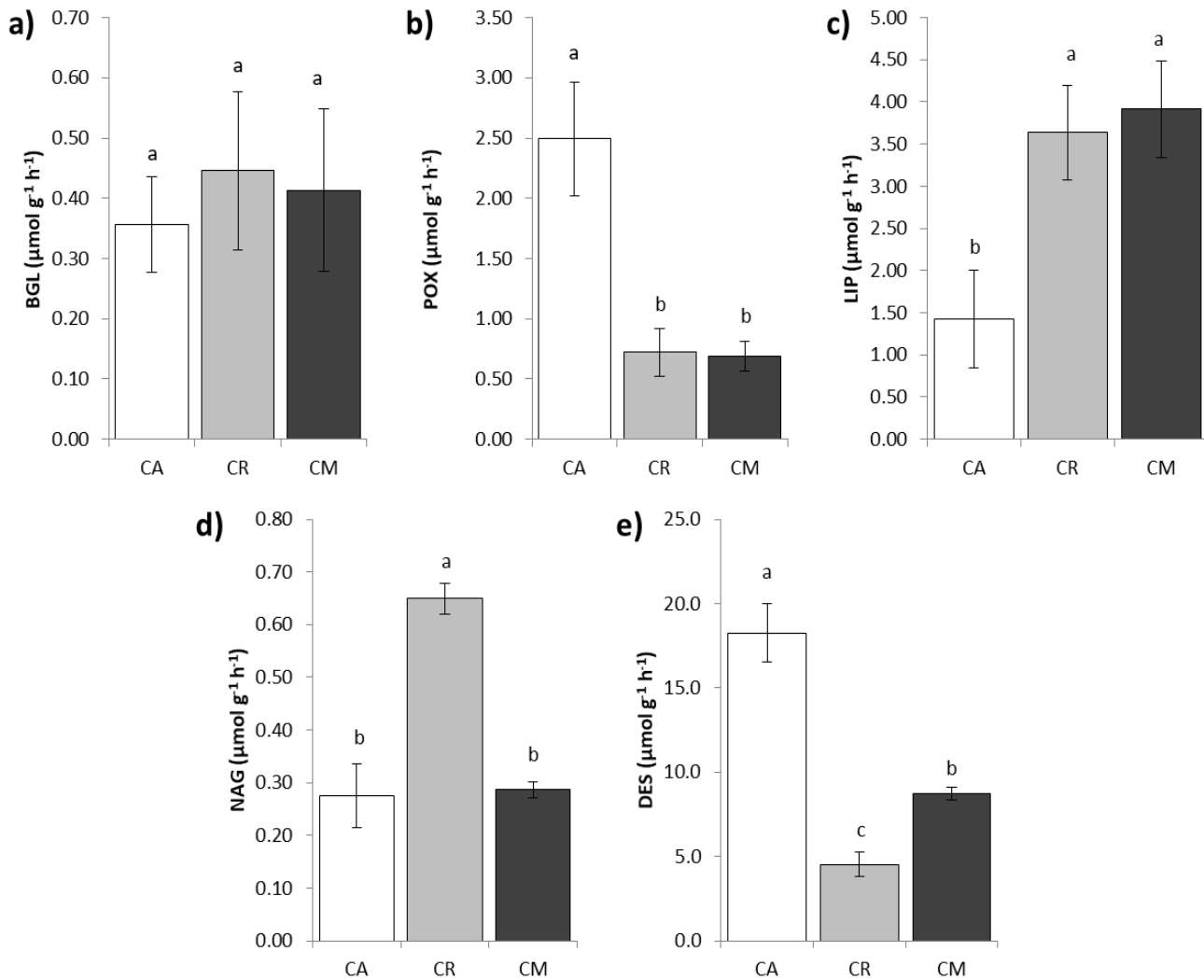


Figura 18. Actividad enzimática (AE) de los microorganismos del suelo. Se muestran los valores promedio de actividad enzimática \pm error estándar de: β -glucosidasa (a) polifenol oxidasa (b), lipasa (c); *N*-acetilglucosaminidasa (d) y deshidrogenasa (e). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras distintas significan diferencias significativas ($p < 0.05$) en la prueba HSD de Tukey.

Se observa que los valores de AEE BGL y AEE LIP (Fig. 19a y 19c) no son significativamente distintos entre las tres condiciones. AEE POX (Fig. 19b) presentó diferencias significativas de CA sobre CM y CR con un 96 y un 92% mayor respectivamente. La AEE NAG (Fig. 19d) presenta el valor menor en el sitio CM que es significativamente distinto de CA en un 22%, pero no presenta diferencias con CR. AEE DES presentó un valor mayor en el sitio CA y los valores de CR y CM significativamente menores en un 93 y 92% respectivamente (Fig. 19e).

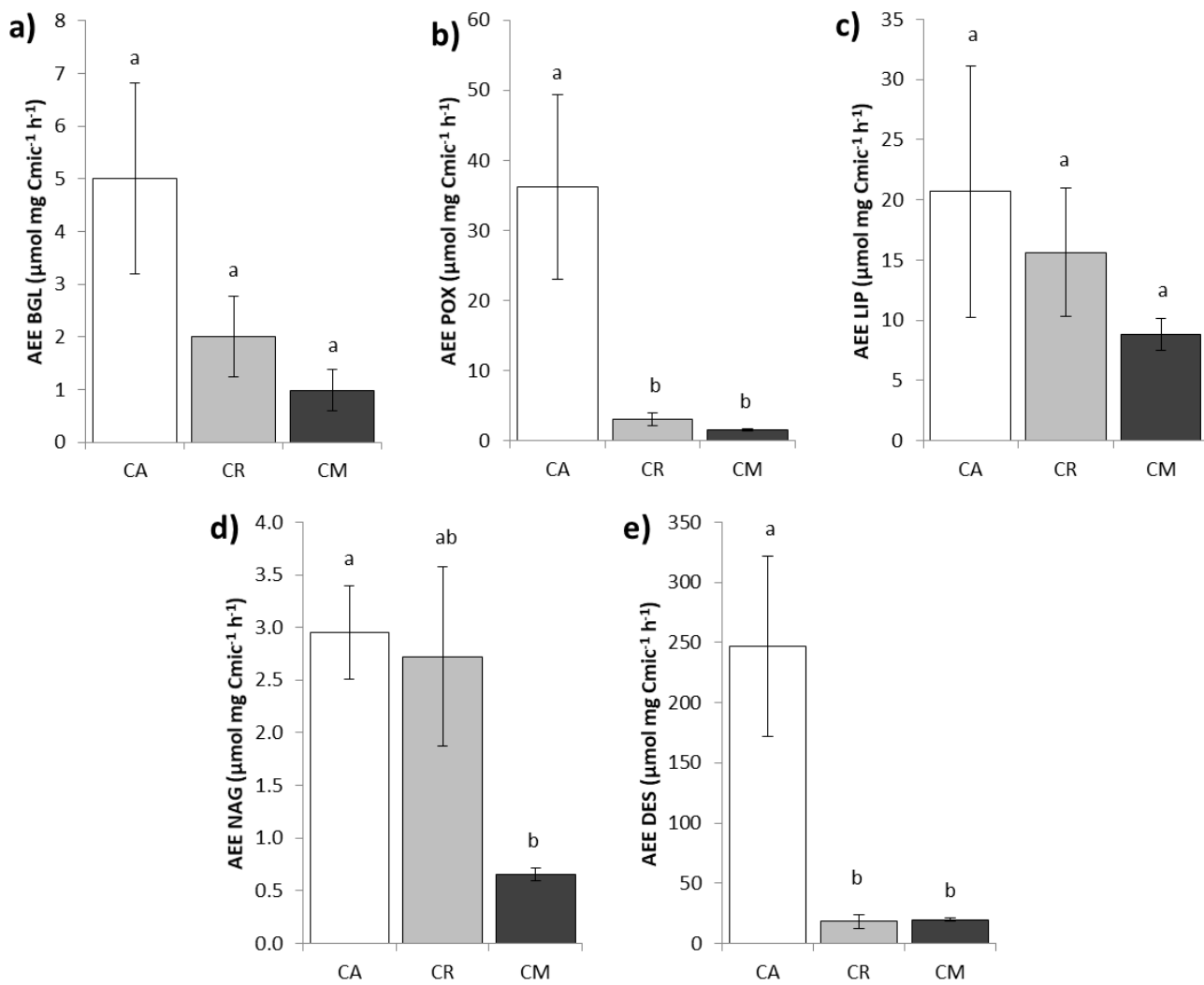


Figura 19. Actividad enzimática específica (AEE) de los microorganismos del suelo. Se muestran los valores promedio de actividad enzimática específica \pm error estándar de: BGL (a), POX (b), LIP (c), NAG (d) y DES (d). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras distintas significan diferencias significativas ($p < 0.05$) en la prueba HSD de Tukey.

Tabla 8. Tabla de ANOVA para datos promedio de actividad enzimática y actividad enzimática específica por condición \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras distintas significan diferencias significativas ($p < 0.05$) en la prueba HSD de Tukey

	CA	CR	CM	ANOVA F(p)
Actividad enzimática ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)				
BGL	0.36 ± 0.08^a	0.45 ± 0.13^a	0.41 ± 0.13^a	0.1(0.8)
POX	2.49 ± 0.47^a	0.72 ± 0.20^b	0.69 ± 0.12^b	11.5 (<0.01)
LIP	1.43 ± 0.58^b	3.64 ± 0.56^a	3.91 ± 0.57^a	5.70 (0.01)
NAG	0.27 ± 0.06^b	0.65 ± 0.03^a	0.29 ± 0.02^b	28.8 (<0.01)
DES	18.26 ± 1.72^a	4.53 ± 0.71^c	8.72 ± 0.36^b	41.4 (<0.01)
Actividad enzimática específica ($\mu\text{mol mg Cmic}^{-1} \text{h}^{-1}$)				
AEE BGL	5.01 ± 1.81^a	2.01 ± 1.077^a	0.99 ± 0.39^a	3.26 (0.07)
AEEPOX	36.18 ± 13.10^a	3.03 ± 0.95^b	1.52 ± 0.21^b	6.67 (0.01)
AEE LIP	20.68 ± 10.43^a	15.63 ± 5.34^a	8.82 ± 1.34^a	0.76 (0.49)
AEE NAG	2.95 ± 0.44^a	2.72 ± 0.85^{ab}	0.65 ± 0.06^b	5.22 (0.01)
AEE DES	246.70 ± 74.73^a	18.11 ± 5.97^b	19.66 ± 1.09^b	9.23 (<0.01)

5.4.3. Mineralización potencial de carbono y coeficiente metabólico (qCO_2)

En general los resultados de los ensayos de mineralización potencial de C a 18 días no presentaron diferencias significativas entre las condiciones evaluadas (Fig. 20a).

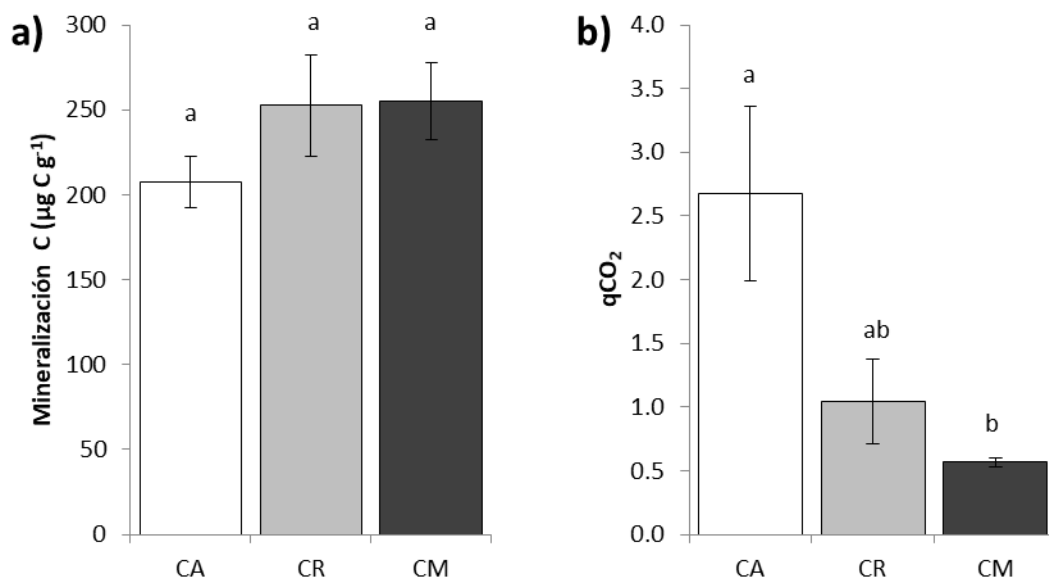


Figura 20. Mineralización potencial de C y coeficiente metabólico (qCO_2) de los microorganismos del suelo. Se muestran los valores promedio \pm error estándar de mineralización potencial de C (a) y qCO_2 (b). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras distintas significan diferencias significativas ($p < 0.05$) en la prueba HSD de Tukey.

Cuando el valor de CO_2 producto de la mineralización de C se pondera por el C_{mic} como es el caso del qCO_2 (Fig. 20b), se observa que el valor más alto, menor eficiencia, se presenta en la condición de CA el cual es sólo diferente de CM, y es esta última condición donde se observa el menor valor o mayor eficiencia.

Tabla 9. Tabla de ANOVA para datos de parámetros biológicos. Valores promedio por sitio \pm error estándar. Valor F y (p). CA= caña de azúcar; CR= cafetal reciente; CM= cafetal maduro. Letras distintas significan diferencias significativas ($p < 0.05$) en la prueba HSD de Tukey

	CA	CR	CM	ANOVA F(p)
Mineralización de C ($\mu\text{g C g}^{-1}$)	207 \pm 14.8 ^a	252 \pm 29.7 ^a	255 \pm 22.4 ^a	1.30 (0.30)
qCO²	2.68 \pm 0.68 ^a	1.04 \pm 0.33 ^{ab}	0.57 \pm 0.04 ^b	6.37 (0.01)

5.5. Análisis Discriminante Linear (ADL) para propiedades químicas y biológicas

Para determinar si las condiciones evaluadas se han separado entre sí en función de la relación entre las variables determinadas, se elaboró un modelo de análisis discriminante lineal (ADL) para dos grupos de variables: a) variables químicas: pHA, SB, [C] en MOP y MOMf, COT, Nt, CIC, NH_4^+ y NO_3^- y b) variables biológicas: Cmic: Nmic, AEE BGL, AEE POX, AEE LIP, AEE NAG, AEE DES y qCO₂. El gráfico de puntajes para la clasificación de observaciones por medio del ADL (Figs. 21 y 22) muestra que, para ambos grupos de propiedades, la función discriminante 1 (FD1) explica el 83% y 92% de la discriminación total respectivamente, mientras que el eje de la función discriminante 2 explica el 17% y 8% respectivamente (Figs. 21 y 21). Es en ambos casos que sobre la función discriminante 1 se observa que la condición de CA se separan claramente CR y CM, los cuales se agrupan de manera muy cercana. Además de lo anterior, la predicción del modelo del ADL para los valores sin validación cruzada en ambos casos (Anexo 1 y 2) fue del 100% para las tres condiciones. Para aumentar la certidumbre del modelo, se realizó la validación cruzada para ambos grupos de variables. En el ADL para las propiedades químicas se observó que el modelo tuvo alrededor de 80% de exactitud en la clasificación de los tratamientos, mientras que para las propiedades biológicas se observa que la exactitud de la clasificación se redujo con valores entre el 60 y 80% para

CR y CM respectivamente, es decir, al tomar una muestra aleatoria de CR y CM existe entre un 20% y 40% de probabilidad que el modelo clasifique las muestras como pertenecientes al otro grupo.

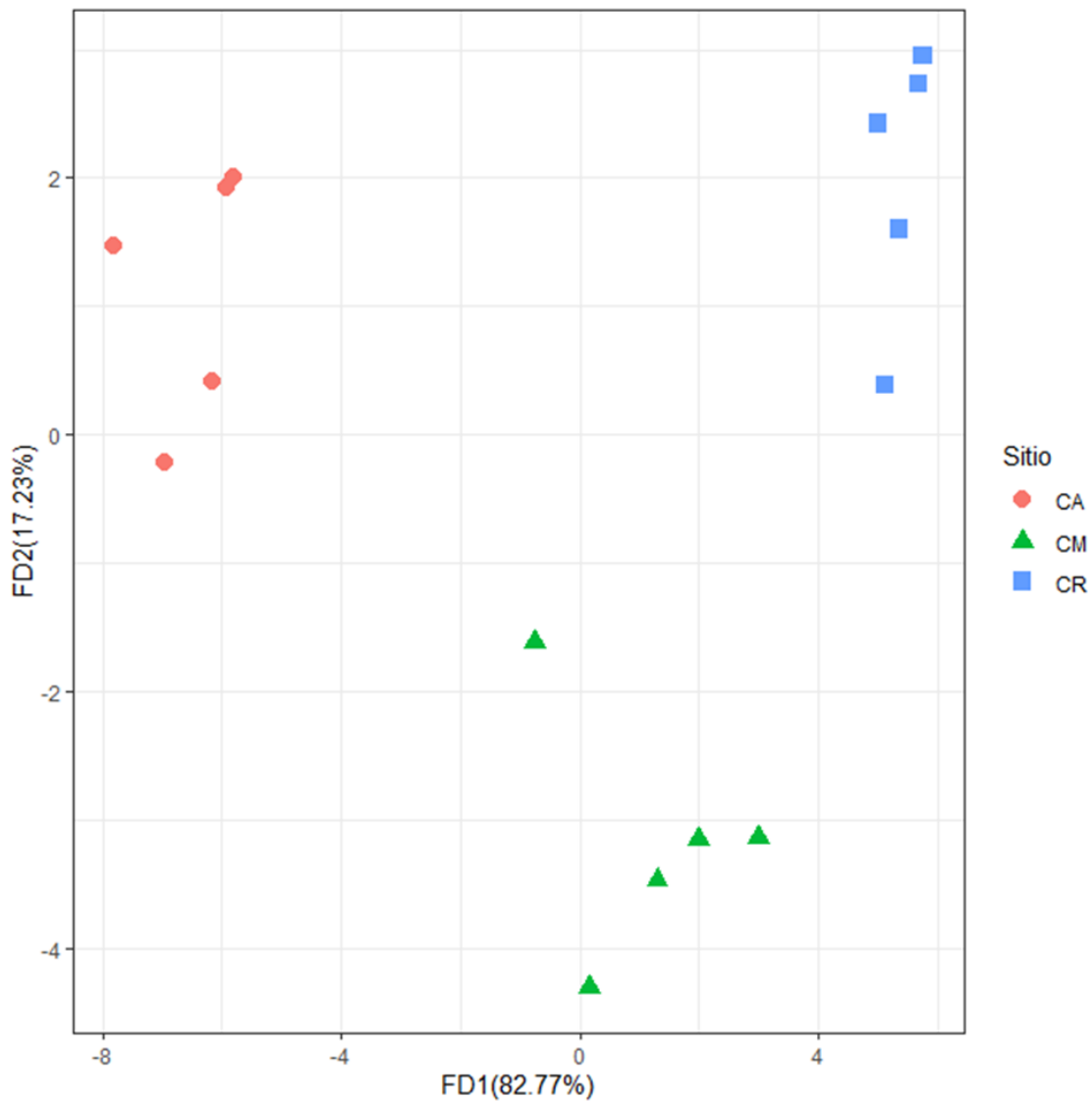


Figura 21. Análisis Discriminante Lineal por tratamiento. Se muestran los gráficos de los puntajes obtenidos mediante ADL de las propiedades químicas del suelo. CA= Caña de azúcar; CM= Cafetal maduro; CR= Cafetal Reciente.

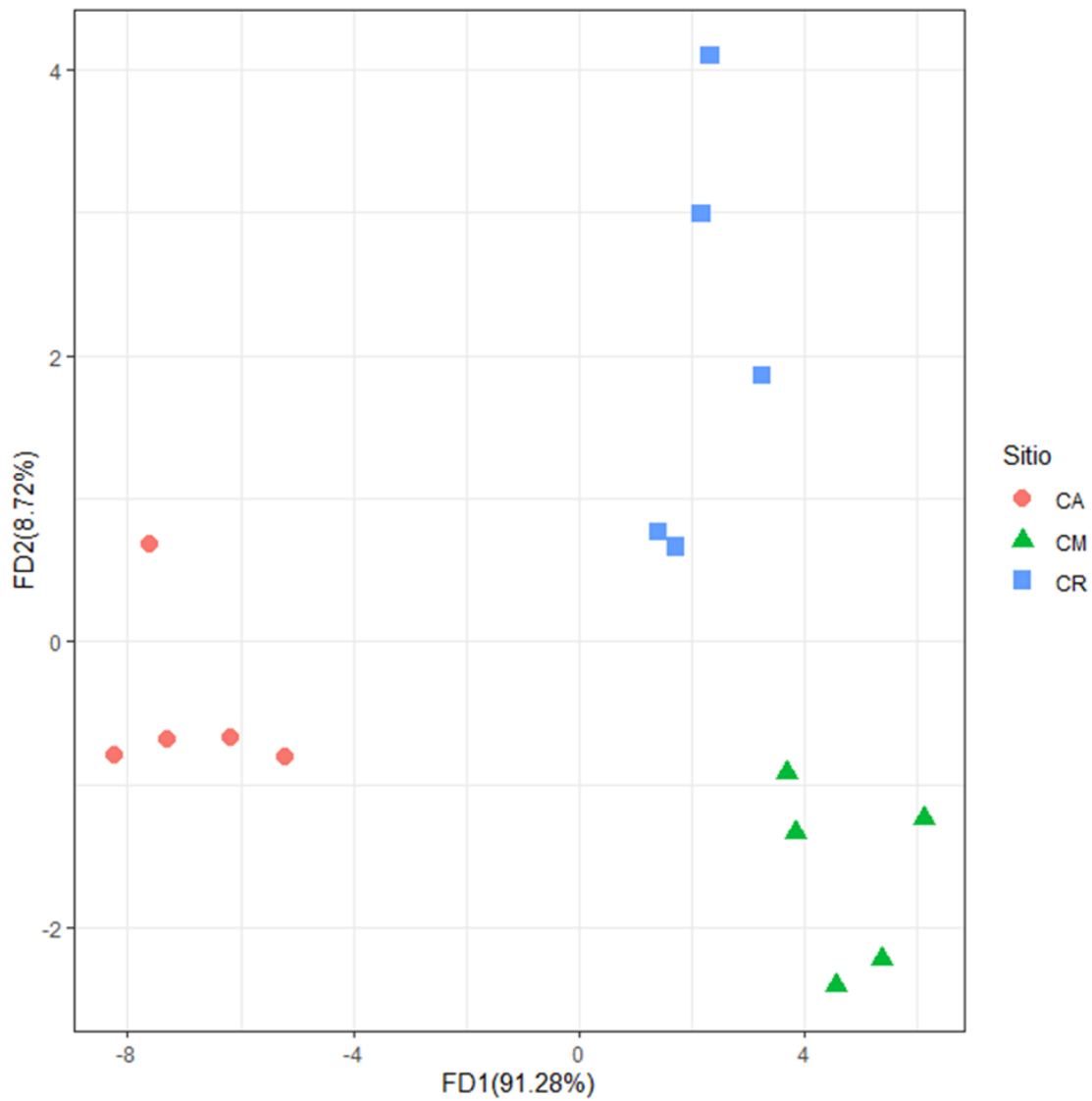


Figura 22. Análisis Discriminante Lineal por tratamiento. Se muestran los gráficos de los puntajes obtenidos mediante ADL de las propiedades biológicas del suelo. CA= Caña de azúcar; CM= Cafetal maduro; CR= Cafetal Reciente.

6. Discusión

La agricultura es la principal actividad económica que provee alimentos a nivel mundial y en la cual el suelo y sus componentes son los actores principales pero que también reciben grandes impactos (Blum, 2013); estos impactos se ven expresados en la alteración de la transformación, flujos y almacenes de nutrientes, lo cuales son dependientes de la forma e intensidad del manejo agrícola (Parikh y James, 2012). En el presente trabajo se identificaron algunos de los cambios que ocurren en la transición hacia un manejo agrícola menos intensivo.

6.1. Cambios en los rasgos macro-morfológicos de los suelos durante la transición de caña de azúcar a café

Se ha establecido que la interacción de los cinco factores formadores de suelo propuestos por Jenny (1941) dirigen a este a través de una serie de estados de desarrollo pedogenético (Targulian y Krasilnikov, 2007; Parikh y James, 2012), dentro de los cuales hay que incluir al manejo agrícola como un sexto factor formador que juega un papel directo y acumulativo en el desarrollo del suelo, el cual promueve la convergencia de los rasgos edáficos, y que se ha definido como agropedogénesis (Kuzyakov y Zamanian, 2019). Aunque entre los perfiles estudiados se observan rasgos distintivos establecidos durante su desarrollo; por ejemplo, la pedregosidad. Particularmente, en el sitio CA se observaron abundantes fragmentos de rocas de tamaño pequeño a grueso a través de todo el perfil (1 m) con un aumento marcado con la profundidad y las cuales se observan escasamente en los dos sitios bajo producción de café (CR y CM) (Fig. 5a). Se considera que el resto de los rasgos pueden ser considerados convergentes en el horizonte superficial o capa arable (horizonte Ap), el cual recibe la mayor influencia por efecto de las prácticas agrícolas (Glab y Kulig, 2008; Khan et al., 2017).

Si bien la clasificación obtenida para estas unidades de suelo difirieron entre los sitios CR y CM con respecto a CA, es poco probable que esta diferencia se deba a los procesos pedogenéticos que dieron lugar a los suelos ya que la distancia entre los sitios de estudio escasamente alcanza los 2 Km de distancia entre CA y los sitios de café y por

consiguiente han sido expuestos al mismo clima durante su historia además de que probablemente partieron del mismo material parental para su formación sin dejar atrás los factores formadores de suelo restantes. Una de las principales características para denominar a CA como Antrosol es la presencia de artefactos de origen antrópico (WRB, 2015), los cuales se observaron en dicho sitio mientras que en CR y CM no se observaron además de la presencia de rocas de diferente tamaño, lo cual da a interpretar que distintas prácticas de manejo dieron origen a la unidad de suelo observada en el sitio.

Se ha reportado que la actividad agrícola genera condiciones de convergencia y que generan sucesivamente un nuevo estado convergente estable a partir de 40 años de manejo (Kuzyakov y Zamanian, 2019). En el contexto anterior, los suelos de los tres sitios de estudio fueron cultivados por lo menos durante 50 años bajo sistemas de producción de caña de azúcar lo cual probablemente generó que los tres sitios bajo el mismo manejo hayan desarrollado condiciones de convergencia en las propiedades los suelos (Kozlovskii, 1999; Homburg y Sandor, 2011; Kuzyakov y Zamanian, 2019), particularmente una vez que estuvieron sujetos al mismo manejo bajo las mismas condiciones ambientales.

Posterior al cambio de manejo se observó que algunas propiedades físicas aún se mantienen como son: la clase textural, la densidad aparente y la humedad; sin embargo, se presentaron rasgos macromorfológicos que se han modificado hacia condiciones más favorables como es el caso de la estructura, la cual ha cambiado de bloques subangulares en CA hacia estructura granular en CM. En este mismo sentido, se demostró que CR no presentó evidencia de compactación del suelo a diferencia de CA y con ello un incremento en la actividad vegetal y de la micro y mesofauna con presencia de raíces finas y medias que además sugiere el restablecimiento de procesos de agregación, lo que se puede reflejar en una mejor movilidad del agua y penetración de las raíces en la última condición como ha sido reportado por Anaya y Huber-Sanwald (2015); los autores encontraron que los suelos bajo prácticas agrícolas de baja intensidad (preservación de los residuos de la cosecha y cero uso de arado) presentaron una mejor agregación y estructura debido a la incorporación de MO al suelo en donde se mostró

una ganancia de hasta 47% de COS, además de que estos cambios se observaron preponderantemente en la capa superficial de 0-10 cm de profundidad.

6.2. Cambios en los procesos biogeoquímicos en los suelos durante la transición de caña de azúcar a café

Los resultados sugieren que una vez que se modifica del tipo de manejo a causa de la transición de cultivo de caña de azúcar a café, se generan condiciones que propician la diferenciación en las características químicas y biológicas de los suelos como ha sido observado en estudios previos sobre el cambio de manejo agrícola (Anaya y Huber-Sannwald 2015; Naranjo de la F. et al., 2016; Medorio-García et al., 2020). Esta diferenciación es más notable entre el suelo de producción de caña de azúcar y las dos condiciones de producción de café, lo cual se observa en el análisis discriminante lineal (ADL; Figs. 21 y 22). Es de resaltar que, aunque entre CR y CM existe una similitud entre los grupos formados por cada condición, se observa una separación de dichos grupos formados por el análisis la cual sugiere que efecto del cambio de manejo continúa hacia una nueva condición en función del tiempo de establecimiento del nuevo manejo agrícola (Guo y Gifford., 2002; Anaya y Hubber-Sanwald, 2015; Crews y Rumsey, 2017).

El cambio en las prácticas agrícolas, en este caso la quema, representa un factor importante en la modificación las propiedades individuales y del suelo como sistema (Figs. 23-25). Por ejemplo, la combustión completa del material vegetal provee de una fuente de cationes básicos hacia el suelo contenidos en la biomasa vegetal (Mastrolonardo et al., 2014), tal como se observa en la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ mayor en CA la cual disminuye conforme avanza el tiempo posterior al cambio de manejo. La supresión del uso de fuego por lo tanto disminuye el aporte de bases intercambiables hacia el suelo que se refleja en una disminución de la saturación de bases y la disminución en el pH en función del tiempo (Figs. 8 y 9). El empleo de fuego como práctica agrícola impacta sobre la biomasa y residuos vegetales presentes sobre suelo y en los cambios de la dinámica a través de la modificación química de las fracciones que la MOS y en condiciones de elevada severidad su pérdida completa (Krull et al, 2004; Crews y

Rumsey 2017). Los cambios en la MOS derivados del empleo del fuego son dependientes de la severidad, lo cuales van desde cambios en la composición química en los residuos orgánicos hasta su completa mineralización, en el caso de severidades bajas e intermedias es común la formación de estructuras de carácter aromático e hidrófobas producto de la carbonización del material (Merino et al 2015; 2018; 2020). Esto es apreciable en las muestras analizadas ya que fue posible observar una señal intensa a los 1600 cm^{-1} en el análisis de FTIR en el sitio CA que pertenece a la señal emitida por compuestos aromáticos de C que puede ser resultado de la presencia de compuestos aromáticos en dicho sitio y el cual no es visiblemente distinguible en los sitios de cafetales CR y CM, lo sugiere una atenuación en la presencia de los compuestos con esas características químicas.

En los suelos estudiados se observó un incipiente incremento, aunque no estadísticamente significativo en la concentración de COS, lo cual sugiere que este parámetro requiere de más tiempo que el transcurrido para expresar diferencias aun cuando la mineralización de C es menor en CM. En general, se ha reportado que el uso de prácticas agrícolas no intensivas (p.e. supresión de fuego, mantenimiento de rastrojo y/o herbáceas) favorecen el incremento de MOS hasta en 78% después de 50 años de una transición productiva; sin embargo, esta ganancia en MOS es sensible a la concentración inicial, es decir que la mayor ganancia se observa en los suelos con una concentración inicial menor (Sarno et al, 2004; Canellas et al., 2010; Anaya y Huber-Sannwald, 2015).

La concentración promedio de COT para los suelos de los tres sitios (3%) se encuentra ligeramente por encima de lo reportado por Medorio-García y colaboradores (2020) en sistemas de caña de azúcar con 50 años de manejo convencional (2.5%), lo muestra valores más altos y que probablemente puede influir en el retardo en la diferenciación en la concentración de COS en los suelos estudiados (Figs. 23-25). No obstante, se espera que conforme avance el tiempo la concentración de COS se incremente a través de la incorporación vía descomposición parcial de los residuos

vegetales senescentes proveniente de los cafetos y las herbáceas acompañantes en el sistema de producción.

A diferencias del COS, la concentración de Nt respondió al cambio de manejo, ya que se cuantificó un incremento en 47% en CM respecto a CA, lo cual es consistente al efecto acumulativo de las prácticas agrícolas con menor intensidad tal como ha sido reportado por distintos autores (Sarno et al, 2004; Canellas et al., 2010; Anaya y Huber-Sannwald, 2015). Como un indicio de ganancia neta de Nt se pueden observar en el análisis de FTIR en las bandas de los 1230 cm^{-1} y 1630 cm^{-1} , las cuales son señales asociadas a proteínas, y en los 1370 cm^{-1} un enriquecimiento de ion nitrato en los sitios de cafetal CR y CM mientras que las señales mencionadas son incipientes o poco observables en el sitio CA.

Aunque no existieron cambios reflejados en la concentración y contenido de COS, pueden ocurrir modificaciones en las distribución y composición química de la MOS (Krull et al., 2004; Lal, 2004; Canellas, 2010). De acuerdo con los resultados obtenidos, la materia orgánica particulada (MOP) disminuye en los tratamientos bajo cafetales (CR y CM) caso contrario con lo observado con la materia orgánica asociada a minerales (MOM), particularmente en la fracción $<53\text{ }\mu\text{m}$ (MOMf), la cual se incrementa. En los modelos de estabilización de la materia orgánica se considera a la MOP como la fracción más sensible, después de la materia orgánica disuelta (MOD), a la descomposición mientras que la MOM es completa o parcialmente inaccesible a la degradación biológica (von Lützow et al., 2006; 2007). Ahora bien, en el contexto de eventos térmicos derivados por quemas, se ha observado que los residuos vegetales parcialmente modificados por fuego o carbonizados, producen cambios químicos en la MOP que disminuye su biodegradabilidad, principalmente un incremento en la concentración de compuestos aromáticos, mientras que la MOM se disocia (Merino et al. 2021). Consistentemente con lo mencionado antes, se observaron estos patrones en los datos del fraccionamiento de la MOS en el presente trabajo en donde se observó una disminución de la concentración de C en la MOP de 509 mg g^{-1} en CA a 405 mg g^{-1} en CM y caso contrario, un aumento en la MOMf de 25 mg g^{-1} a 31 mg g^{-1} en los mismos tratamientos y en el caso más notable

en la MOMg de 5 mg g^{-1} a 36 mg g^{-1} , es decir un aumento de 7 veces la concentración de C (Tabla 6; Figs. 14 y 15).

Lo anteriormente descrito es reforzado con el análisis de espectroscopía infrarroja, el cual sugieren un cambio en la abundancia de algunos componentes orgánicos lábiles de la MOP a través del tiempo a partir del cambio de manejo. Es así que se observa que la señal asociada a moléculas de mayor estabilidad química o recalcitrancia, como anillos aromáticos y enlaces dobles C-C (Fig. 16) se encuentran presentes en condición sometida a manejo con fuego, lo cual indica una menor accesibilidad para consumo de los microorganismos del suelo y una mayor inversión energética (Merino et al., 2015; 2021) mientras que en los cafetales la MOP presenta una mayor intensidad en señales asociadas a proteínas y lípidos, y la disminución en la señal asociada con compuestos aromáticos (Mastrolonardo et al., 2014). Por lo anterior, aunque en la condición de CA hay una mayor proporción de MOP esta es potencialmente menos lábil que en las condiciones bajo producción de café, CR y CM (Mendham et al., 2004; von Lützow et al., 2007; Cerli et al., 2012).

Por consiguiente, la MOP en los sitios de café puede ser más fácilmente ser despolimerizada por la comunidad microbiana y con ello se acelera la interacción de los productos orgánicos no asimilados con las partículas minerales del suelo (Cotrufo et al., 2015; von Lützow et al., 2007). Lo anterior es consistente con el incremento en la proporción de MOMf observada en los sistemas de café (Fig. 14); la MOMf es la consecuencia de la adsorción que realiza la fracción mineral de tamaño $<53 \mu\text{m}$ con la MO como resultado del intercambio de cargas y puentes catiónicos y que es considerada un componente importante en la estabilización de la MOS (von Lützow et al., 2007; Moni et al 2012; Merino et al, 2018).

La transformación de los compuestos orgánicos en los suelos es principalmente producto de la actividad microbiana, hongos y bacterias, la cual presenta una elevada sensibilidad a los cambios químicos y físicos del suelo provocados por el manejo agrícola (Raiesi y Beheshti, 2014; Luo et al 2017). En la transición productiva evaluada, se

observó que la biomasa microbiana aumentó al igual que la eficiencia en el uso de recursos una vez establecidos los sistemas de producción de café (Figs. 17, 20, 23-25). Así también, la concentración de C y N contenidos en la biomasa microbiana de los suelos presentó un incremento del 87% en CM con respecto a CA. Distintos estudios (p. e. Pajares et al., 2007; Sarker et al., 2018) han reportado el aumento de estos nutrientes contenidos en la biomasa microbiana en sistemas con manejo de bajo impacto como es la adición periódica de enmiendas orgánicas, reducción en intensidad y frecuencia de arado, la rotación de cultivos y en algunos casos el descanso del suelo por temporadas, es decir, en condiciones de manejo con baja intensidad.

La eficiencia en el uso de los recursos por la microbiota del suelo está en función de la cantidad de C que invierten para la producción de exoenzimas respecto a la cantidad que almacenan en su biomasa (Raiesi y Beheshti, 2014). El cambio químico en los residuos vegetales como los provocados por el efecto de la quema agrícola en el sistema de producción de café produce que los microorganismos estén expuestos a residuos orgánico químicamente estables (Merino et al., 2015) ante lo cual se deberá invertir más energía para la despolimerización de estos compuestos y por tanto serán menos eficientes en el uso de los recursos. Los resultados muestran que la comunidad microbiana posee una eficiencia metabólica mayor en los tratamientos con prácticas agrícolas con menor intensidad (CR y CM), es decir, presentan una mejor capacidad fisiológica al invertir menor cantidad de recursos por unidad de biomasa (Medeiros et al., 2014). Es de notar que estos indicadores bioquímicos poseen una gran sensibilidad debido a que son mediadoras de la descomposición de la MOS y reciclaje y disponibilidad de nutrientes (Baldrian, 2009; Raiesi y Beheshti, 2014; Acosta-Martínez et al, 2018) lo cual es inmediatamente observable con el efecto de perturbaciones externas, en este caso como las prácticas agrícolas; por ello los cambios más notables en el presente trabajo tuvieron se reflejaron en los ajustes metabólicos de la comunidad microbiana, muy particularmente en la actividad EAA DES en donde el valor de CA es 12 veces mayor con $246 \mu\text{mol mg Cmic}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en CA y 19.66 en CM mientras que el $q\text{CO}_2$ en fue 5 veces mayor en CA.

Ahora bien, si se torna la atención en la fase final del procesamiento/consumo de MO por parte de los microorganismos del suelo (mineralización) se observa la actividad deshidrogenasa (DES), enzima clave para la oxidación biológica de la MOS y utilizada como un indicador de la actividad microbiana (Zhang et al., 2010; Salazar et al., 2011), en el sitio CA fue cuatro y dos veces mayor que en CR y CM respectivamente (Fig. 18e), es decir, la actividad de los microorganismos fue mayor a pesar del menor tamaño de su biomasa en el sitio cultivado con caña de azúcar. Los valores de DES ponderados con el tamaño de la biomasa de los microorganismos del suelo (AEE DES; Fig 19e) mostraron diferencias significativamente mayores en CA con casi 13 veces su valor que en CR y CM, es decir, los microorganismos sólo utilizan las fuentes de energía disponibles para su subsistencia y emiten casi tanto CO₂ en los tres sitios (Figs 23-25). En el caso de la mineralización potencial de N, se observó una probable inhibición de la nitrificación en CA debido a las altas concentraciones de amonio como lo reportado por distintos autores (Koper et al., 2010; Medorio-García et al., 2020) o debido a que se ha demostrado que el NH₄⁺ presenta menor susceptibilidad a pérdidas por lixiviación o desnitrificación que el NO₃⁻. Otra fuente de pérdida de este elemento tan limitante en sistemas naturales o agrícolas es por la volatilización de compuestos nitrogenados debido a la quema característica en las plantaciones de caña de azúcar (García-Oliva et al 1999; Medorio-García et al., 2020). Sin embargo, se requiere profundizar en los mecanismos de uso y regulación en el ciclo del nitrógeno en este sistema, que no se pudo alcanzar en el presente trabajo.

A manera de cierre, se puede decir que los procesos que ocurren por medio de los flujos y almacenes ilustrados en los modelos de funcionamiento de los sistemas (Figs. 23-25), aunque no son los únicos que se llevan a cabo en el suelo, presentan múltiples modificaciones en magnitud y sentido debido a la intensidad del manejo que reciben. Además, si bien algunos indicadores no mostraron cambios aparentes a escalas gruesas como el caso del almacén de COT, cuando se observa en escalas finas es claro que los procesos y componentes son modificados. Por último, los componentes biológicos del suelo son los que mayor respuesta presentaron ante los cambios que reciben los

sistemas en ambos sentidos, positivos y negativos, debido a la sensibilidad de estos a cualquier modificación en su entorno y se observó que la condición que mayor limitación presentó para la actividad microbiana asociada al suelo fue CA ya que, como se observó existe sólo una subsistencia básica de los microorganismos sin una ganancia neta de nutrientes que implicaría un incremento de la biomasa mientras que en CM se observó una promoción de la actividad de la comunidad microbiana en la eficiencia y su consiguiente crecimiento. Una de las funciones descritas para el suelo es la de ser un archivo histórico de lo que acontece en el medio (Weil y Brady, 2017) y queda claro que las prácticas agrícolas forman parte de este archivo ya que indican de donde viene el estado de sus componentes y por consiguiente hacia donde se dirigen ya sea por efectos del manejo o de manera natural.

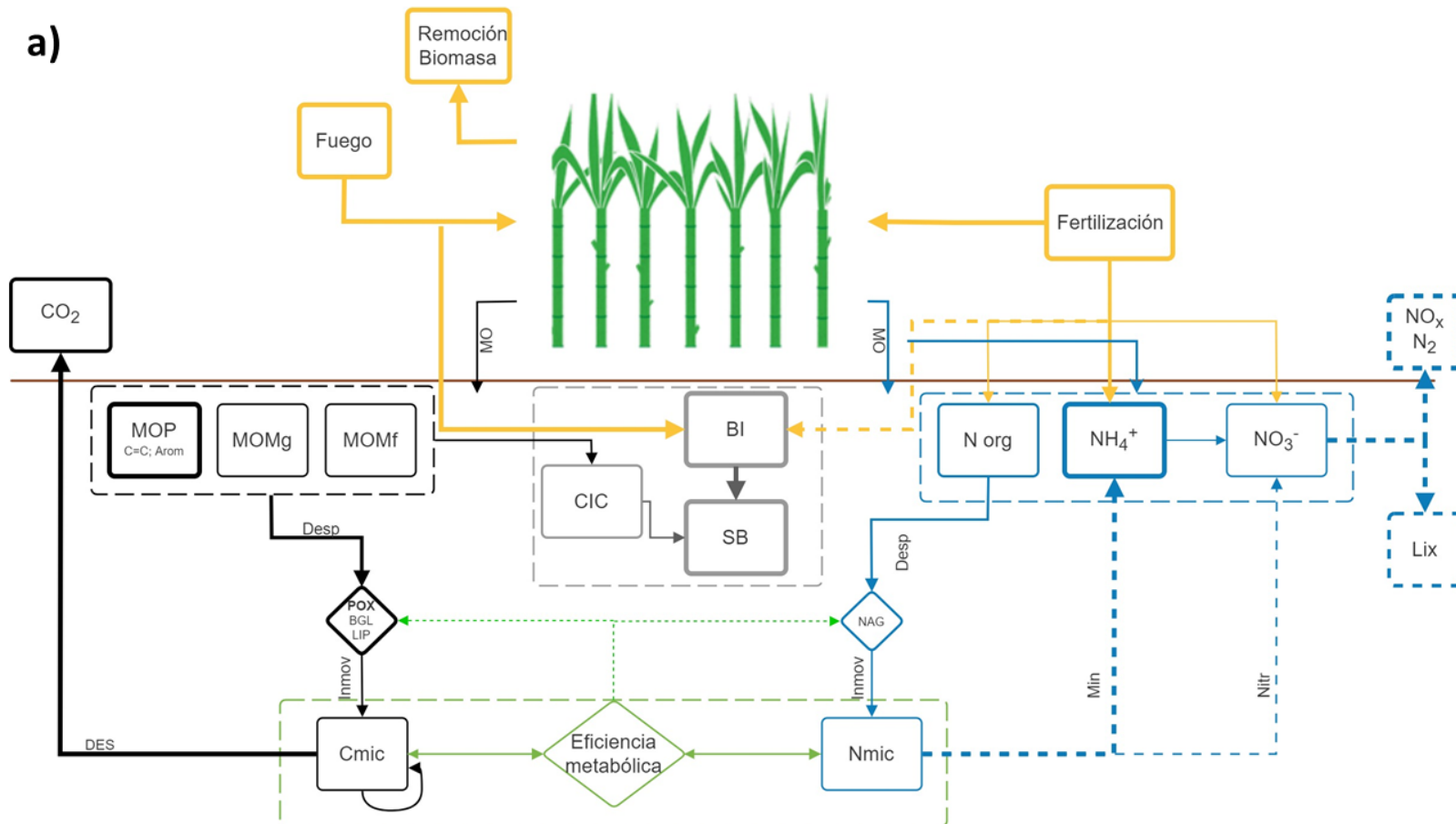


Figura 23. Modelos de interacción de propiedades y funcionamiento del sistema de producción de caña de azúcar (CA) con influencia de prácticas de manejo. Se muestran los flujos (flechas) y almacenes (cajas) de C (negro), N (azul) y BI y SB (gris), así como la influencia de las prácticas de manejo (amarillo) y eficiencia metabólica de la comunidad microbiana y tamaño de su biomasa (verde). Líneas sólidas representan mediciones realizadas, líneas punteadas procesos inferidos. MOP: materia orgánica particulada; MOMg: materia orgánica unida a minerales >63 μm ; MOMf: materia orgánica unida a minerales <63 μm ; POX: polifenol oxidasa; BGL: β glucosidasa; LIP: lipasa; NAG: N-acetilglucosaminidasa; Cmic: C inmovilizado en biomasa microbiana; Nmic: N inmovilizado en biomasa microbiana; NH₄⁺: amonio; NO₃⁻: nitrato; N₂: molecular; NO_x: óxidos de N; BI: bases intercambiables; SB: % de saturación de bases; CIC: capacidad de intercambio catiónico; MO: materia orgánica.

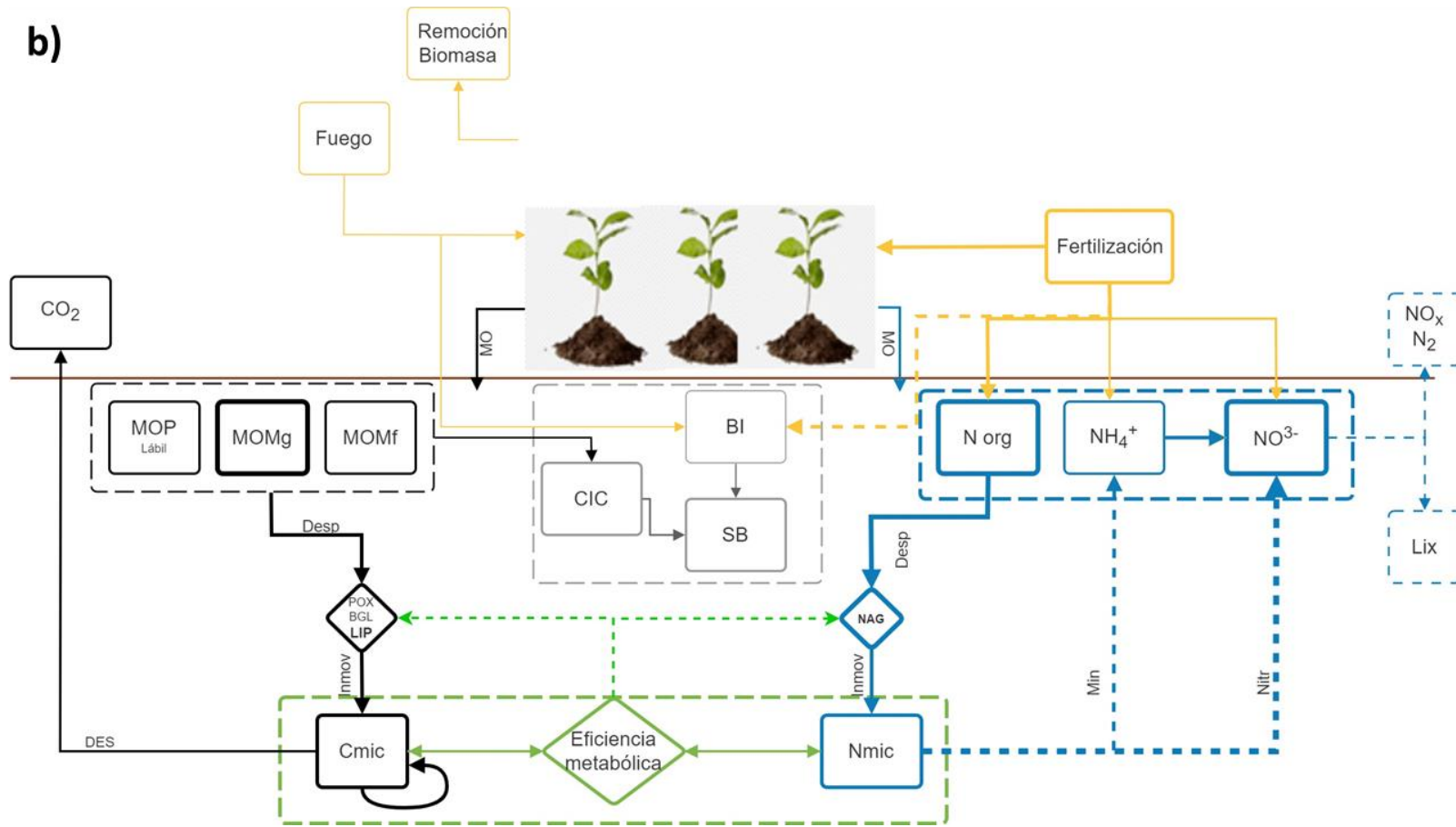


Figura 24. Modelos de interacción de propiedades y funcionamiento del sistema de producción de cafetal recientemente establecido (CR) con influencia de prácticas de manejo. Se muestran los flujos (flechas) y almacenes (cajas) de C (negro), N (azul) y BI y SB (gris), así como la influencia de las prácticas de manejo (amarillo) y eficiencia metabólica de la comunidad microbiana y tamaño de su biomasa (verde). Líneas sólidas representan mediciones realizadas, líneas punteadas procesos inferidos. MOP: materia orgánica particulada; MOMg: materia orgánica unida a minerales >63 μm ; MOMf: materia orgánica unida a minerales <63 μm ; POX: polifenol oxidasa; BGL: β glucosidasa; LIP: lipasa; NAG: N-acetilglucosaminidasa; Cmic: C inmovilizado en biomasa microbiana; Nmic: N inmovilizado en biomasa microbiana; NH_4^+ : amonio; NO_3^- : nitrato; N_2 : molecular; NO_x : óxidos de N; BI: bases intercambiables; SB: % de saturación de bases; CIC: capacidad de intercambio catiónico; MO: materia orgánica.

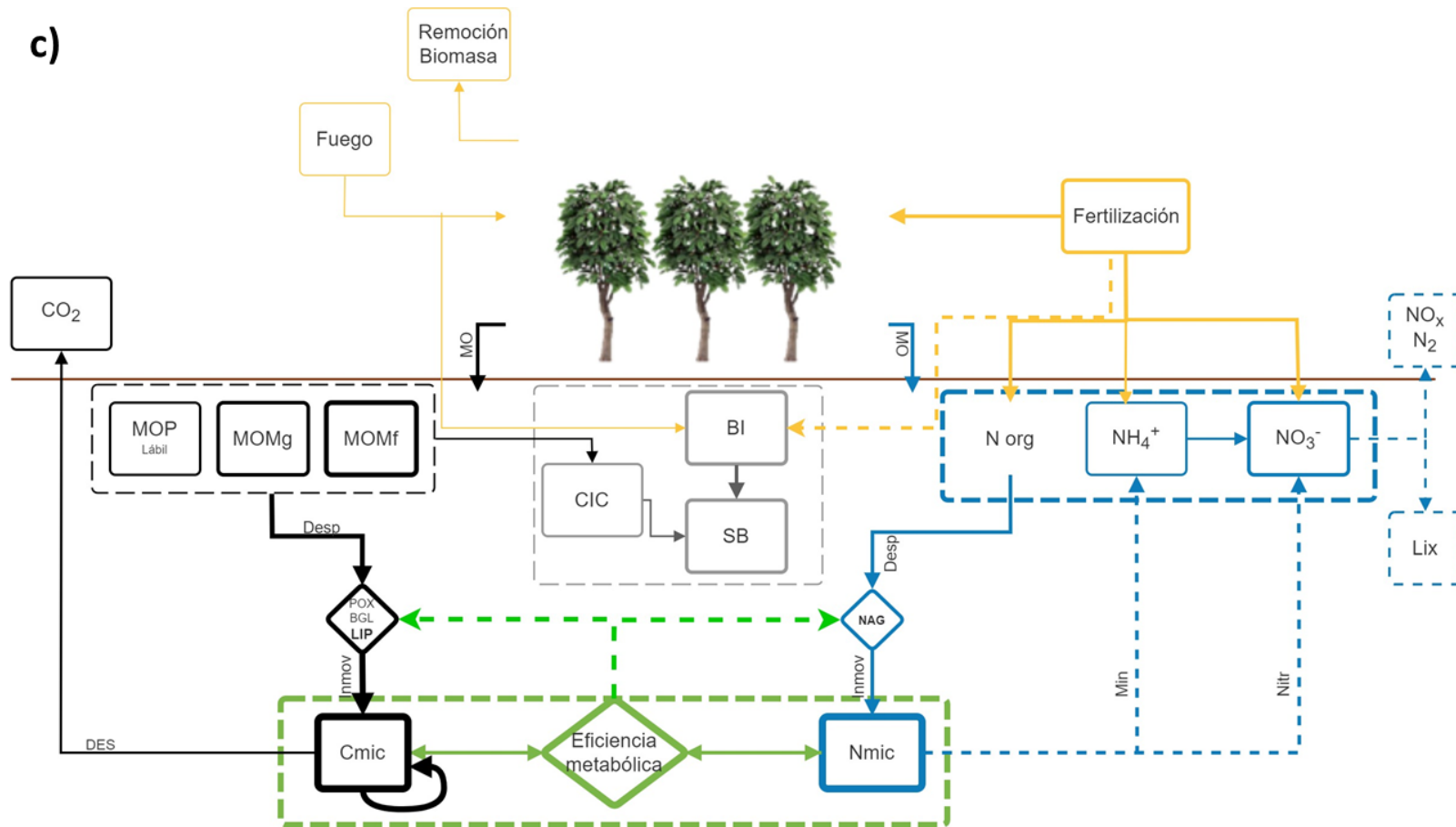


Figura 25. Modelos de interacción de propiedades y funcionamiento del sistema de producción de café en un sistema productivo (CM) con influencia de prácticas de manejo. Se muestran los flujos (flechas) y almacenes (cajas) de C (negro), N (azul) y BI y SB (gris), así como la influencia de las prácticas de manejo (amarillo) y eficiencia metabólica de la comunidad microbiana y tamaño de su biomasa (verde). Líneas sólidas representan mediciones realizadas, líneas punteadas procesos inferidos. MOP: materia orgánica particulada; MOMg: materia orgánica unida a minerales $>63 \mu\text{m}$; MOMf: materia orgánica unida a minerales $<63 \mu\text{m}$; POX: polifenol oxidasa; BGL: β glucosidasa; LIP: lipasa; NAG: N-acetilglucosaminidasa; Cmic: C inmovilizado en biomasa microbiana; Nmic: N inmovilizado en biomasa microbiana; NH_4^+ : amonio; NO_3^- : nitrato; N_2 : molecular; NO_x : óxidos de N; BI: bases intercambiables; SB: % de saturación de bases; CIC: capacidad de intercambio catiónico; MO: materia orgánica.

7. Conclusiones

- Los suelos en los sistemas de producción mostraron características macromorfológicas superficiales más estables en el cafetal maduro (CM) como resultado del manejo con menor intensidad.
- Las propiedades del suelo utilizadas en el presente estudio, tales como concentración y contenido de C y N totales pueden ser considerados como indicadores tan gruesos que no permiten identificar cambios a corto y mediano plazo.
- El fraccionamiento de MOS por densidad mostró que el cambio de manejo a cafetal incremental la cantidad de COS en su fracción más estable dentro del suelo (MOMf) además de tener un enriquecimiento en componentes orgánicos lábiles de C y N en la fracción particulada (MOP).
- La intensidad de las prácticas agrícolas provocó un efecto diferencial en la magnitud del cambio en las propiedades del suelo. Además, se observó que los atributos biológicos son más sensibles a las prácticas agrícolas a corto-mediano plazo a diferencia de las propiedades químicas como el almacenamiento de carbono.

8. Referencias

- Acosta-Martínez, V., Cano, A., Johnson, J. 2018. Simultaneous determination of multiple soil enzyme activities for soil health-biogeochemical indices. *Applied Soil Ecology* 126: 121-128.
- Aguilar-Rivera, N., Algara, Siller, M., Olvera-Vargas, L.A., Michel-Cuello, C. 2018. Land management in Mexican sugarcane crop fields. *Land Use Policy* 78: 763-780.
- Ahn, P.M. y Hintze, B. 1990. No tillage, minimum tillage, and their influence on soil properties. En: *Organic-matter Management and Tillage in Humid and Sub-humid Africa*. pp. 341-349. IBSRAM Proceedings No.10.
- Al-Kaisi, M., Kruse, M., & Sawyer, J. 2008. Effect of Nitrogen Fertilizer Application on Growing Season Soil Carbon Dioxide Emission in a Corn-Soybean Rotation. *Journal Of Environmental Quality* 37 (2):325-332.
- Anaya, C.A., Huber-Sannwald, E. S. 2015. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil & Tillage Research*, 147: 20-29.
- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Robertson, A.H.J., Potts, J.M., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Comont, L., Disnar, J.R., Francez, A.J. 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 515-527.
- Aziz, I., Mahmood, T., Rafiq-Islam. 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil & Tillage Research* 131: 28-35.
- Baldrian, P. 2009. Microbial enzyme-catalyzed processes in soils and their analysis. *Plant Soil Environment*. 55 (9): 370-378.
- Base Referencia Mundial del Recurso Suelo 2014 (WRB). 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Actualización 2015.
- Bekiaris, G., Peltre, C., Barsberg, S.T., Bruun, S., Sørensen, K.M., Engelsen, S.B., Magdi, J., Hansen, M., Jensen, L. 2020. Three different Fourier-transform mid-infrared sampling techniques to characterize bio-organic samples. *Technical Reports. Organic Compounds* 49:1310-1321.
- Bernux, M y Cerri, C.E.P. 2005. Soil Organic Components. *GEOCHEMISTRY. Encyclopedia of Analytical Science*, 203–208.

- Blum, W.E.H. 2013. Soil and Land Resources for Agricultural Production: General Trends and Future Scenarios-A Worldwide Perspective. *International Soil and Water Conservation Research* 1(3): 1-14.
- Boerner, R.E.J y Brinkman, J.A. 2003. Fire frequency and soil enzyme activity in southern Ohio oak-hickory forests. *Applied Soil Ecology* 23 (2):137–146.
- Boerner, R.E.C., Hart, S., Huang, J. 2009. Impacts of Fire and Fire Surrogate treatments. *Ecological Applications*, 19 (2): 338–358.
- Bowman, W.D., Cleveland, C.C., Halada, L., Hresko, J., Baron, J.S. 2008. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nature Geoscience* 1:767-770.
- Cabrera-Vázquez, Y. 2019. Transformaciones pedogenéticas por efecto del cambio de uso de suelo en sistemas cultivados por caña en la región de Córdoba, Veracruz. Tesis de Grado. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-2014. Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México.
- Cerli, C., Celi, L., Kalbitz, K., Guggenberger, G., Kaiser, K."021 Separation of light and heavy organic matter fractions in soil — Testing for proper density cut-off and dispersion level. *Geoderma* 170: 403-416.
- Cerri, C.C., Galdos, M.V., Maia, S.M.F., Bernoux, M., Feigl, B.J., Powlson, D., Cerri, C.E.P. 2011. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. *European Journal of Soil Science* 62: 23-28.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1-10.
- Chaudhari, P.R., Ahire, D.V., Ahire, V.D., Chkravarty, M., Maity, S. 2013. Soil Bulk Density as related to Soil Texture, Organic Matter Content and available total Nutrients of Coimbatore Soil. *International Journal of Scientific and Research Publications* 3(2).
- Chávez-Vergara, B., Merino, A., Vázquez-Marrufo, G., y García-Oliva, F. 2014. Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. *Geoderma*, 235: 133-145.
- Chávez-Vergara, B., Rosales-Castillo, A., Merino, A., Vázquez-Marrufo, G., Oyama, K., García-Oliva, F. 2016. Quercus species control nutrients dynamics by determining the composition and activity of the forest floor fungal community. *Soil Biology and Biochemistry*, 98: 186-195.

- Chávez-Vergara, B., Merino, A., González-Rodríguez, A., Oyama, K., García-Oliva, F. 2018. Direct and legacy effects of plant traits control litter decomposition in a deciduous oak forest in Mexico. *PeerJ*, 6, e5095.
- Cotrufo, F., Soong, J., Horton, A., Campbell, E., Haddix, M., Wall, D., Parton, W. 2015. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience* 8:776-779.
- Crews, T.E., Rumsey, B.E. 2017. What Agriculture Can Learn from Native Ecosystems in Building Soil Organic Matter: A Review. *Sustainability* 9 (578)
- Dalal, R.C., Wang, W., Robertson, G.P., Parton, W.J. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research* 41 (2): 165-195.
- De Souza-Junior, P.R., Brunharo, C.A.C.G., Furlani, C.E.A., Prado, R.M., Maldonado-Júnior, W., Zerbato, C. 2017. Phosphorus fertilization in sugarcane cultivation under different soil managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 21(10): 665-669.
- Dong, W., Zhang, X., Wang, H., Dai, X., Sun, X., Qiu, W., Yang, F. 2012. Effect of Different Fertilizer Application on the Soil Fertility of Paddy Soils in Red Soil Region of Southern China. *PLoS ONE* 7:e44504.
- Ellert, B.H., Janzen, H.H. 2008. Nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions from irrigated cropping systems as influenced by legumes, manure and fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science* 88: 207-217.
- El Fels, L., Zamama, M., El Asli, A., Hafidi, M. 2014. Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. *International Biodeterioration & Biodegradation* 87: 128-137.
- Fageria, N.K. 2008. Optimum Soil Acidity Indices for Dry Bean Production on an Oxisol in No-Tillage System. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39: 845-857.
- Fialho, J.S., de Aguiar, M.I., Maia, L.S., Magalhaes, R.B., Silva-de Araújo, F.C., Campanha, M.M., de Oliveira, T.S. 2013. Soil quality, resistance and resilience in traditional agricultural and agroforestry ecosystems in Brazil's semiarid region. *African Journal of Agricultural Researches*, 40: 5020-5031.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. *FAO fertilizer and plant nutrition bulletin* No. 16.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2007. Diversification by smallholder farmers: Viet Nam Robusta Coffee. Agricultural Management Marketing and Finance working document.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. FAOSTAT.
- Flores-Delgadillo, L. y Alcalá-Martínez, R. 2010. Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de Física de Suelos. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Folch, C., Alarcón-Gutiérrez, E., Criquet, S. 2007. ABTS assay of phenol oxidase activity in soil. *Journal of microbiological methods* 71: 319-324.
- García, E., 1998. Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. 5ta edición. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- García-Oliva, F., Sanford Jr., R.L., Kelly, E., 1999. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. *Geoderma* 88: 1–12.
- Gessner, M., Swan, C., Dang, C., McKie, B., Bardgett, R., Wall, D., Hattenschwiler, S. 2010. Diversity meets decomposition. *Trends in Ecology and Evolution* 25:372-380.
- Glab, T., Kulig, B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). 2008. *Soil & Tillage Research* 99: 169-178.
- Global Soil Partnership. 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) En: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-fertility/en/>
- Guo, L.B., Gifford, R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 8: 345–360.
- Hart, S.C., DeLuca, T.H., Newman S.G., MacKenzie, M.D., Boyle, S.I. 2005. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology Management* 220:166–184.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191: 77-87
- Hatten, J., Liles, G. 2019. A “healty” balance. The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. *Developments in Soil Science* 36: 373-396.

- Hernández-Becerra, N., Tapia-Torres, Y., Beltrán-Paz, O., Blaz, J., Souza, V., García-Oliva, F. 2016. Agricultural land-use change in a Mexican oligotrophic desert depletes ecosystem stability. *PeerJ* 4:e2365
- Homburg, J.A., Sandor, J.A. 2011. Anthropogenic effects on soil quality of ancient agricultural systems of the American Southwest. *Catena* 85: 144-154.
- Huffman, E. 1977. Performance of a new automatic carbon dioxide coulometer. *Microchemical Journal* 22 (4): 567-573.
- Hussain, I., Olson, K.R., Ebelhar, S.A. 1999. Long-Term Tillage Effects on Soil Chemical Properties and Organic Matter Fractions. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1335-1341.
- Ibarra-Arzave, G., Romero-Lázaro, R., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Barceinas, H., López-Martínez, R., Chávez-Vergara, B., Pi-Puig, T., Calmus, T. (2019). Paleopedogénesis, sedimentación y evolución geomorfológica holocénica en el sistema fluvial del Arroyo Tinajas, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36:378-392.
- Jenny, H.J., 1941, *Factors of soil formation*: New York, McGraw-Hill, 281 p.
- Joergensen, R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the KEC value. *Soil Biology and Biochemistry*. 28: 25-31.
- Joergensen, R.G., Mueller, T., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the KEN value. *Soil Biology and Biochemistry*. 28, 33-37.
- Khan, S., Shah, A., Nawaz, M., Khan, M. 2017. Impact of different tillage practices on soil physical properties, nitrate leaching and yield attributes of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Sciences and Plant Nutrition* 17 (1): 240-252.
- Kniker, H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biochemistry* 85: 91-118.
- Koper, T.E., Stark, J.M., Habteselassie, Y.M., Norton, J.M. 2010. Nitrification exhibits Haldane kinetics in an agricultural soil treated with ammonium sulfate or dairy-waste compost. *FEMS Microbiology Ecology* 74 (2): 316-322.
- Kozlovskii, F.I. 1999. The Modeling of Agropedogenesis in Plowed Soils on Mantle Loams. *Eurasian Soil Science* 32 (6): 710-720.

- Krull, E.S., Skjemstad, J.O., Baldock, J.A. 2004 Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Report for GRDC, Project CSO00029. Canberra: GRDC; 2004.
- Kuzyakov, Y., Zamanian, K. 2019. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation. *Biogeosciences* 16: 4783-4803.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623–1627.
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J., Qin, Z., McNamara, N., Zinn, Y., Llorente, M., Liebig, M., Kuhnert, M., Dondini, M., Don, A., Diaz-Pines, E., Datta, A., Bakka, H., Aguilera, E. and Hillier, J., 2020. Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology* 26: 4158-4168.
- Leganière, J., Angers, D.A., Paré, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 16: 439-453.
- Lou, Y., Xu, M., Chen, X., He, X., Zhao, K. 2012. Stratification of soil organic C, N and C:N ratio as affected by conservation tillage in two maize fields of China. *Catena* 95: 124-130.
- Luo, L., Meng, H., Gu, J. 2017. Microbial extracellular enzymes in biogeochemical cycling of ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 197: 539-549.
- Luong, Q.V., Tauer, L.W. 2006. A real options analysis of coffee planting in Vietnam. *Agricultural Economics* 35: 49-57.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., Di Foggia, M., Bonora, S., Rumpel, C., Certini, G. 2014. Application of thermal and spectroscopic techniques to assess fire-induced changes to soil organic matter in a Mediterranean forest. *Journal. of Geochemistry. Exp.* 143: 174-182.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., Di Foggia, M., Bonora, S., Forte, C., Certini, G. 2015. Soil pyrogenic organic matter characterisation by spectroscopic analysis: a study on combustion and pyrolysis residues. *Journal of Soils and Sediments* 15 (4): 769-780.
- Matoso-Campanha, M., Silva-Santos, R.H., de Freitas, G.B., Prieto-Martinez, M., Ribeiro-Garcia, S.L., Finger, F.L. 2004. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems* 63: 75-82.

- Medeiros, E.V., Alcantara-Notorato, K., Alves-deBarros, J., Silva-Moraes, W., Oliveira-Silva, A., Moreira, K.A. 2014. Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas. *Soil & Tillage Research* 145: 208-215.
- Medorio-García, H.P., Alarcón, E., Flores-Esteves, N., Montaña, N.M., Perroni, Y. 2020. Soil carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in sugarcane plantations converted from tropical dry forest. *Applied Soil Ecology* 154: 103600.
- Mendham, D.S., Heagney, E.C., Corbeels, M., O'Connell, A.M., Grove, T.S., McMurtie, R.E. 2004. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 1067-1074.
- Merino, A., Chávez-Vergara, B., Salgado, J., Fonturbel, M.T., García-Oliva, F., Vega, J.A. 2015. Variability in the composition of charred litter generated by wildfire in different ecosystems. *CATENA* 133: 52-63.
- Merino, A., Fonturbel, M.T., Fernández, C., Chávez-Vergara, B., García-Oliva, F., Vega, J. 2018. Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate. *Science of the Total Environment* 627: 622-622.
- Merino, A., García-Oliva, F., Fonturbel, M., Vega, J. 2021. The high content of mineral-free organic matter in soils increases their vulnerability to wildfire in humid-temperate zones. *Geoderma* 395:115043.
- Minasny, B., McBratney, A.B., Brough, D.M., Jacquier, D. 2011. Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration. *European Journal of Soil Science* 62: 728-732.
- Moguel, P., Toledo, V.M. 1999. Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*: 11-21
- Moni, C., Derrien, D., Hatton, P., Zeller, B., Kleber, M. 2012. Density fractions versus size separates: does physical fractionation isolate functional soil compartments? *Biogeosciences* 9:5181-5197.
- Morris, S.J., Blackwood, C.B. 2015. The Ecology of the Soil Biota and their Function. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, 273-309.
- Murphy, B.W. 2015. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research* 53: 605-635.
- Nandiayato, A.B.D., Oktiani, R., Ragadhita. 2019. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material. *Indonesian Journal of Science & Technology* 4 (1): 97-118.

- Naranjo de la F., J., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L.C., Carrillo-Ávila, E., Palma-López, D.J. 2006. Changes in the properties of a Mexican Fluvisol following 30 years of sugarcane cultivation. *Soil & Tillage Research* 88: 160–167.
- Neugschwandtner, R.W., Liebhard, P., Kaul, H.P., Wagentristl, H. 2014. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant, Soil and Environment* 60: 57-62.
- Nicolodi, M., and Gianello, C. 2015. Understanding soil as an open system and fertility as an emergent property of the soil system. *Sustainable Agriculture. Res.*, 4(1), 94.
- Nihei, T., Hayashi, H., Shirota, R. 2015. Characteristics of sugarcane production in the State of São Paulo, Brazil. *Geographical Space* 8: 53-80.
- Ochoa-Neira, M., Reyes-García, M., Manríquez-Nuñez., J. 2010. Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México. FIRA. Boletín Informativo, Núm 11. 65 pp.
- Oppenheim, S. 2001. Alternative Agriculture in Cuba. *American Entomologist* 47 (4): 216-227.
- Osman, K., 2013. *Soils. Principles, Properties and Management*. Dordrecht: Springer.
- Pajares, S., Gallardo, J.F., Masciandaro, G., Ceccanti, B., Marinari, S., Etchevers, J.D. 2009. Biochemical indicators of carbon dynamic in an Acrisol cultivated under different management practices in the central Mexican highlands. *Soil & Tillage Research* 105: 156-163.
- Parikh, S.J., James, B.R. 2012. Soil: The Foundation of Agriculture. *Nature Education Knowledge* 3(10):2.
- Pietikäinen, J., Fritze, H. 1995. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification. *Soil Biology and Biochemistry*. 27: 101–109.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo, M., Roquero-de-Labru, C. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi Prensa 3ª Ed. 807 pp.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Raiesi, F., Beheshti, A. 2014. Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses topaddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of northwest Iran. *Applied Soil Ecology*.
- Red Mesoamericana para la Gestión Integral de Riesgos (RMGIR). 2011. Atlas de Riesgos del Municipio Amatlán de los Reyes 2011. Consultado en:

http://rmqir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_30014_AR_AMATLAN_REYES.pdf

- Rice, R.A. 1999. A place unbecoming: The coffee farm of Northern Latin America. *Geographical Review* 84: 554-579.
- Reynolds, S.G. 1970. The gravimetric method of soil moisture determination. Part 1. A study of equipment and methodological problems. *Journal of Hidrology* 11: 258-273.
- Rojas-Sánchez, A.; Hartman-Ulloa, K.; Almonacid-Márquez, R. 2012. El impacto de la producción de café sobre la biodiversidad, la transformación del paisaje y las especies exóticas invasoras. *En Ambiente y Desarrollo* 16 ((30): 93-104.
- Roskoski J.P.1982. Nitrogen fixation in a Mexican coffee plantation. In: Robertson G.P., Herrera R., Rosswall T. (eds) *Nitrogen Cycling in Ecosystems of Latin America and the Caribbean. Developments in Plant and Soil Sciences*, vol 6. Springer, Dordrecht.
- Salazar, S., Sanchez, L., Alvarez, J., Valverde, A., Galindo, P., Igual, J., Peix, A., SantaRegina, I. 2011. Correlation Among Soil Enzyme Activities Under Different Forest System Management Practices. *Ecological Engineering*, 37: 1123-1131.
- Sanullah, M., Usman, M., Wakeel, A., Cheema, S.A., Ashraf, I., Farooq, M. 2019. Terrestrial ecosystem functioning affected by agricultural management systems: A review. *Soil & Tillage Research* 196: 104464.
- Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortés, V.H., García-Chávez, L.R., Covarrubias-Gutiérrez, I. 2014. Dinámica de la producción cañera en México, Periodo 2000 a 2011. *Agro Productividad* 7: 23-29.
- Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortés, V.H., García-Chávez, L.R., Covarrubias-Gutiérrez, I., Merino, A. 2016. Influence of drought and irrigation on sugarcane yields in different agroecoregions in Mexico. *Agricultural Systems* 143:126–135.
- Santin, C., Doerr, S.H., 2016. Fire effects on soils: the human dimension. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 371: 20150171.
- Sarno, Lumbanraja, J., Afandi et al. 2004. Effect of weed management in coffee plantation on soil chemical properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 69: 1-4.
- Sarker, J.R., Singh, B.P., Dougherty, W.J., Fang, Y., Badgery, W., Hoyle, F.C., Dalal, R.C., Cowie, A.L. 2018. Impact of agricultural management practices on the nutrient supply potential of soil organic matter under long-term farming systems. *Soil & Tillage Research*. 175: 71-81.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015. Ficha Técnica del Cultivo de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*L.). <http://conadesuca.gob.mx/DocumentosEficProductiva/1.%20Campo/Ficha%20Técnica%20Caña%20de%20Azúcar.pdf> Fecha de consulta 02 de julio de 2020.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2018. En: [https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es#:~:text=En%20México%20hay%2015%20estados,%25\)%20y%20Puebla%20\(15.3%25\).&text=La%20Organización%20Internacional%20del%20Café,productores%20de%20café%20del%20mundo](https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es#:~:text=En%20México%20hay%2015%20estados,%25)%20y%20Puebla%20(15.3%25).&text=La%20Organización%20Internacional%20del%20Café,productores%20de%20café%20del%20mundo). Fecha de consulta 02 de julio de 2020.

Secretaría de Finanzas y Planeación (SEFIPLAN). 2017. Cuadernillos municipales 2017 Amatlán de los Reyes. Gobierno de Veracruz. En: <http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2017/05/Amatlán-de-los-Reyes.pdf> . Fecha de consulta 19 de mayo de 2019.

Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. 2017. Manual para la evaluación y descripción ecológica de suelos en el campo. 3ª Ed.

Souza, R.A., Santos-Telles, T., Machado, W., Hungria, M., Tavares-Filho, J., Guimaraes, M.F. 2012. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 155:1-6.

Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough II, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research* 99: 4-48.

Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. 2011. *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge, UK. Cambridge University Press

Targulian, V.O., Krasilnikov, P.V. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71: 373- 381.

Tully, K.L., Lawrence, D., Wood, S.A. 2013. Organically managed coffee agroforests have larger soil phosphorus but smaller soil nitrogen pools than conventionally managed agroforests. *Biogeochemistry* 115: 385-397.

- Verma, S., Jayakumar, S. 2012. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* 2:168-176.
- Von Lützow, M.V., Kögel-Knaber, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions— a review. *European Journal of Soil Science* 57: 426–445.
- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Review. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 2183-2207.
- Watson, K., Achinelli, M.L. 2008. Context and contingency: the coffee crisis for conventional small-scale coffee farmers in Brazil. *The Geographical Journal* 174: 223-234.
- Weil, R.R., Brady, N.C. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15^{va} edición. Pearson Education Limited. Harlow, Inglaterra.
- Yoo, G., Yang, X., Wander, M.M., 2011. Influence of soil aggregation on SOC sequestration: a preliminary model of SOC protection by aggregate dynamics. *Ecological Engineering*. 37, 487–495.
- Zhang, N., He, X., Gao, Y., Li, Y., Wang, H., Ma, D., Zhang, R., Yang, S. 2010. Pedogenic Carbonate and Soil Dehydrogenase Activity in Response to Soil Organic Matter in *Artemisia ordosica* Community. *Pedosphere*, 20: 229-235.
- Zhang, M., Govindaraju, M. 2018. Sugarcane Production in China. Chapter 3 Sugarcane Technology and Research
- Zhang, X., Guo, J., Vogt, R.D., Mulder, J., Wang, Y., Qian, C., Wang, J., Zhang, X. 2020. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands. *Geoderma* 366: 114234.

Anexos

Anexo 1

Tabla 9. Resultados clasificatorios para propiedades químicas del Análisis Discriminante Linear (ADL).

Tratamiento	Muestra	CA	CR	CM	Precisión de clasificación (%)
Valores sin validación cruzada					
CA	1	1	<0.01	<0.01	
	2	1	<0.01	<0.01	
	3	1	<0.01	<0.01	
	4	1	<0.01	<0.01	
	5	1	<0.01	<0.01	100
CR	1	<0.01	1	<0.01	
	2	<0.01	0.99	<0.01	
	3	<0.01	1	<0.01	
	4	<0.01	1	<0.01	
	5	<0.01	0.99	<0.01	100
CM	1	<0.01	<0.01	0.99	
	2	<0.01	<0.01	0.99	
	3	<0.01	<0.01	0.99	
	4	<0.01	<0.01	1	
	5	<0.01	<0.01	1	100
Valores con validación cruzada					
CA	1	1	<0.01	<0.01	
	2	1	<0.01	<0.01	
	3	1	<0.01	<0.01	
	4	1	<0.01	<0.01	
	5	0.99	<0.01	<0.01	100

CR	1	<0.01	1	<0.01	
	2	<0.01	<0.01	1	
	3	<0.01	0.99	<0.01	
	4	<0.01	1	<0.01	
	5	<0.01	0.99	<0.01	80
CM	1	<0.01	<0.01	0.99	
	2	<0.01	0.96	<0.05	
	3	<0.01	<0.01	0.99	
	4	<0.01	<0.01	1	
	5	<0.01	<0.01	0.99	80

Anexo 2

Tabla10. Resultados clasificatorios para propiedades biológicas del Análisis Discriminante Linear (ADL).

Tratamiento Muestra	CA	CR	CM	Precisión de clasificación (%)
Valores sin validación cruzada				
CA	1	1	<0.01	<0.01
	2	1	<0.01	<0.01
	3	1	<0.01	<0.01
	4	1	<0.01	<0.01
	5	1	<0.01	<0.01
CR	1	<0.01	0.99	<0.01
	2	<0.01	0.99	<0.01
	3	<0.01	0.99	<0.01
	4	<0.01	0.99	<0.01
	5	<0.01	0.99	<0.01
CM	1	<0.01	<0.01	0.99
	2	<0.01	<0.01	0.99
	3	<0.01	<0.01	0.99
	4	<0.01	<0.01	0.99
	5	<0.01	<0.01	0.99
Valores con validación cruzada				
CA	1	1	<0.01	<0.01
	2	1	<0.01	<0.01
	3	1	<0.01	<0.01
	4	1	<0.01	<0.01
	5	1	<0.01	<0.01
CR	1	<0.01	1	<0.01

	2	<0.01	<0.1	0.9	
	3	<0.01	<0.01	0.99	
	4	<0.01	0.94	<0.1	
	5	<0.01	0.99	<0.01	60
	<hr/>				
	1	<0.01	0.94	<0.1	
	2	<0.01	<0.01	0.99	
CM	3	<0.01	<0.01	0.99	
	4	<0.01	<0.01	0.99	
	5	<0.01	<0.01	0.99	80
	<hr/>				