



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ENMIENDAS ORGÁNICAS DE SUELO EN CONTEXTO DE  
CAMBIO CLIMÁTICO**

**BENJAMÍN VICENTE ABARZÚA TORRES**

**Santiago, Chile  
2022**



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ENMIENDAS ORGÁNICAS DE SUELO EN CONTEXTO DE  
CAMBIO CLIMÁTICO**

**SOIL ORGANIC AMENDMENTS IN CLIMATE CHANGE CONTEXT**

**BENJAMÍN VICENTE ABARZÚA TORRES**

**Santiago, Chile  
2022**



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**ENMIENDAS ORGÁNICAS DE SUELO EN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Memoria para optar al título  
Profesional de Ingeniero Agrónomo

**BENJAMÍN VICENTE ABARZÚA TORRES**

**PROFESORES GUÍAS**

Sr. Osvaldo Salazar Guerrero  
Ingeniero Agrónomo, Ms. PhD

7,0

Sr. Francisco Nájera De Ferrari  
Ingeniero Agrónomo, Mg. Dr.

7,0

**PROFESORES EVALUADORES**

Sra. Yasna Tapia Fernández  
Ingeniera en Alimentos, Dra.

6,0

Sra. Paola Silva C.  
Ingeniera Agrónoma, Mg. Dra.

4,5

**Santiago, Chile**  
**2022**

## GLOSARIO

**Cambio Climático:** Se refiere a un cambio de estado del clima que puede ser identificado por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades que persiste por períodos extensos, generalmente décadas o más. En la memoria se utiliza el concepto para referirse a los impactos que genera el CC: Aumento de la temperatura promedio, incremento de frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, cambios en los patrones y cantidad de precipitaciones y aumento del nivel del mar.

**Gases de efecto invernadero (GEI):** Se denomina GEI a aquellos que al encontrarse en contacto con la atmósfera son retenidos en ella y redireccionan la energía del sol a la superficie terrestre ocasionando el denominado efecto invernadero.

**Enmiendas orgánicas:** Cualquier material originado de plantas o animales incorporado al suelo con el objetivo de mejorar y/o sustituir propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo para construir un ambiente favorable para la producción agrícola

**Carbono lábil:** Es la fracción del carbono orgánico que se caracteriza por ser de fácil y rápida degradación microbiana y su oxidación maneja el flujo de CO<sub>2</sub> entre el suelo y la atmósfera.

**Carbono recalcitrante:** Componente de la materia orgánica del suelo resistente a la descomposición microbiana o protegida por partículas minerales del suelo.

**Stock de carbono:** Cantidad de carbono contenido en un pool o reservorio de carbono presente en un sistema capaz de acumular y liberar carbono al suelo.

**Actividad microbiana:** Puede ser determinada al cuantificar la cantidad de dióxido de carbono que es liberado por la descomposición de los microorganismos luego de entregar materia orgánica al suelo.

**Mineralización del carbono:** Proceso que ocurre a partir de la descomposición microbiana de la materia orgánica en el cual se obtienen compuestos inorgánicos simples asimilables como parte del ciclo de un nutriente.

**Emisiones de CO<sub>2</sub>:** Flujo de CO<sub>2</sub> desde el suelo a la atmósfera producto de la degradación microbiana del material orgánico.

**Biochar:** Enmienda orgánica que se obtiene luego de someter cualquier residuo orgánico a altas temperaturas en ausencia de oxígeno

**Estiércol animal:** Enmienda orgánica constituida por heces de animales, por lo general ligados a la agricultura, aves, bovinos, ovinos, cerdos, etc.

**Abono verde:** Corresponde a un cultivo producido con el objetivo de ser incorporado al suelo cuando aún se encuentra verde para mejorar las propiedades del suelo.

**Vermicompost:** Es un tipo de compostaje que consiste en la utilización de lombrices para la degradación de la materia orgánica y a través de sus heces entregar un material orgánico que utilizado como sustrato.

**Eficiencia del uso del carbono (CUE):** Se define como la proporción del carbono total absorbido por los microorganismos que es destinada al crecimiento microbiano.

**Coefficiente metabólico:** Se define como la tasa de respiración microbiana por unidad de biomasa microbiana.

**Q10:** Es el factor a partir del cual una tasa de una reacción en este caso biológica se incrementa por cada 10°C de aumento en la temperatura. Es estimado a partir de la ecuación 1 utilizada en la sección de resultados.

**Efecto priming:** Se refiere al aumento de la tasa de descomposición de la materia orgánica en el suelo producto de la entrega de nueva materia orgánica externa.

## ÍNDICE

ENMIENDAS ORGÁNICAS DE SUELO EN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	1
GLOSARIO.....	1
ÍNDICE.....	3
RESUMEN.....	4
SUMMARY.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
Objetivos.....	9
METODOLOGÍA.....	10
Criterios y selección de datos bibliográficos.....	10
Sistematización de la información.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
Orden y caracterización de la información.....	13
Distribución geográfica y procedencia.....	13
Límites establecidos por categorías.....	14
Efecto de las enmiendas orgánicas en la mineralización y biomasa microbiana.....	15
Emisiones de CO <sub>2</sub> en relación al tipo de enmienda y factor suelo.....	17
Efecto del aumento de temperatura en las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	18
Efecto de las enmiendas en la biomasa microbiana y mineralización del carbono.....	20
Efecto en la biomasa microbiana.....	20
Mineralización de la materia orgánica.....	22
Efectos de enmiendas orgánicas y suelos en el flujo y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	23
Efecto del aumento de la temperatura en las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	25
CONCLUSIONES.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	28
APÉNDICE 1.....	39

## RESUMEN

Los sistemas agroalimentarios se encuentran en permanente adaptación a nuevas condiciones medioambientales por el efecto del cambio climático, lo que induce al análisis y cuestionamiento de las prácticas agrícolas actuales. Bajo este contexto ha resurgido la aplicación de enmiendas orgánicas al suelo, práctica comúnmente utilizada por nuestros ancestros para el cultivo de plantas, que busca cuidar el recurso suelo disminuyendo la contaminación, la erosión y la degradación, utilizando todo tipo de residuos orgánicos, procesados o no, para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. A partir de esta premisa este trabajo condujo un análisis monográfico con carácter meta analítico que consideró alrededor de 850 artículos enfocados en aplicación de enmiendas orgánicas al suelo y su efecto en la actividad microbiológica y la dinámica del carbono (C). El objetivo de este trabajo es contrastar los efectos de las enmiendas orgánicas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos en función del aporte al flujo de CO<sub>2</sub> atmosférico. Cuatro enmiendas formaron parte del análisis: Compost, biochar, estiércol y rastrojos de cultivo dado que, son ampliamente utilizadas a nivel mundial y los manejos de incorporación y de aplicación de estas enmiendas son similares en todo el mundo. Se distingue una clara predominancia de investigaciones provenientes de los continentes Asia y Europa respecto al resto del mundo, donde la mayoría corresponden a estudios que abordan los efectos de enmiendas de biochar y estiércol. Según la información evaluada, el comportamiento de la respiración microbiana, cuantificada como el flujo de emisiones de dióxido de C (CO<sub>2</sub>) tras aplicar enmiendas orgánicas, se ve afectado por diferencias en textura de suelo y composición de la enmienda, evidenciando aumentos o disminuciones de CO<sub>2</sub> emitido. De esta manera, se establece que texturas de suelo arcillosas y enmiendas en base a rastrojos de cultivo entregan el máximo aumento a las emisiones y, al contrario, enmiendas de biochar en texturas arenosas lo minimizan o inhiben. Así también, se analizó la incidencia de un aumento progresivo de temperatura luego de aplicada una enmienda, donde se obtuvo distintos niveles de incremento en la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en función del material empleado. A partir de enmiendas en base a materiales de baja descomposición en el suelo como es el caso del biochar se disminuyen o inhiben y, al contrario, aumentan al utilizar materiales de rápida descomposición como el abono verde. Se evidencia también que las condiciones bajo las cuales se efectúan los estudios ya sea en laboratorio o en campo determinan la magnitud de las diferencias en el flujo de CO<sub>2</sub>. Esta revisión bibliográfica concluye que la utilización de enmiendas orgánicas puede ser beneficiosa para mejorar las propiedades del suelo y disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> utilizando el tipo de enmienda que mejor se ajuste a las necesidades del suelo, ya que distintos materiales producen efectos diversos. La actividad de los microorganismos en la gran mayoría de los casos es promovida por la aplicación de una enmienda orgánica y está estrechamente relacionada con el tipo de C contenido en la enmienda. Esto demuestra que debemos considerar el efecto del cambio climático ante la posibilidad de utilización de las enmiendas orgánicas y adaptar su funcionalidad a las condiciones medioambientales para lograr el objetivo deseado protegiendo al medio ambiente, esto requiere de estudios de campo y laboratorio especialmente en áreas con menor información como Sur América.

**Palabras Claves:** Enmiendas orgánicas, emisiones de CO<sub>2</sub>, actividad microbiana, mineralización del carbono, biomasa microbiana.

## SUMMARY

Agri-food systems are constantly adapting to new environmental conditions due to climate change, leading to dialogue and questioning current agricultural practices. In this context, the application of organic amendments to agricultural soils, an ancient and commonly used technique, has resurfaced. The application of organic matter seeks to care for the soil resource by reducing contamination, erosion, and soil degradation using all types of organic waste, processed or not, and thus improve its physical, chemical, and biological properties. Based on this premise, a meta-analogical monographic analysis was conducted. It considered about 850 articles focused on organic amendments according to their effect on microbiological activity and soil carbon (C) dynamics. Four amendments were part of the analysis: compost, biochar, manure, and stubble. Globally, management incorporating the application of amendments comes worldwide, but there is a clear predominance of the Asian continent and Europe concerning the rest of the continents. Of the total number of articles considered in the review, most correspond to studies dealing with the effects of biochar or manure amendments on the soil. The results were based on the relationship between organic amendments and soil respiration quantified from the C dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions flux. Several articles show a positive correlation between the amount of CO<sub>2</sub> emissions, soil texture, and the amendments used, showing a clear difference in the trends when these factors are modified and obtaining an increase in emissions in three of the four amendments in the presence of clay soils. Another of the factors analyzed that affects CO<sub>2</sub> emissions is temperature; after applying an organic amendment, the progressive increase in temperature up to a threshold value increases the magnitude of CO<sub>2</sub> emissions, showing a positive relationship between both variables. Finally, it is concluded that organic amendments can be beneficial for maintaining and preserving of agricultural soils if properly applied. The activity of microorganisms in most cases is promoted by organic amendments and is closely related to the type of C contained in the amendment. In the context of climate change, it is possible to choose between different organic amendments to environmental conditions to achieve functionality. These need to be evaluated in field studies with other environmental conditions, especially in areas where the information is scarce, like south America.

**Key Words:** Organic amendments, CO<sub>2</sub> emissions, microbial activity, carbon mineralization, microbial biomass.

## INTRODUCCIÓN

El rubro agrícola se encuentra en un proceso de constante renovación con el objetivo de dar respuesta a las necesidades y desafíos globales que se han manifestado en el último tiempo (Gori Maia *et al.*, 2018). Desafíos como el cambio climático (CC), el aumento demográfico y la pérdida de ecosistemas naturales son fenómenos determinantes a considerar en los cambios y adaptaciones de los agroecosistemas al mundo actual (Tompkins & Adger, 2004). A partir de las proyecciones de un crecimiento exponencial de la población mundial y un aumento en la demanda de alimentos para los próximos años (Howden *et al.*, 2007) se han adoptado sistemas agrícolas intensivos que aumentan los rendimientos (Wang *et al.*, 2018), a través de la utilización de insumos como agroquímicos, pesticidas, semillas modificadas, fertilización sintética y maquinaria pesada (Raven & Wagner, 2020). Sin embargo, el abuso en la utilización y dependencia de inputs externos ha favorecido una serie de problemáticas tanto en la población como en el medioambiente.

En primer lugar, varios autores respaldan que este tipo de químicos contribuyen con procesos que degradan el medio ambiente aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la contaminación de recursos naturales como suelos y cuerpos de agua (Zalidis *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2018; Luan *et al.* 2020). Se ha registrado un alza en las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera, del orden de 50 Pg. producto de la actividad antrópica en suelos cultivados (Paustian *et al.*, 2000). Se ha comprobado que la agricultura intensiva deteriora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo constituyendo una amenaza para la biodiversidad edáfica y la materia orgánica del suelo (MOS), dos componentes esenciales en la calidad de este mismo (Lal, 2015). En segundo lugar, existe una desconfianza por parte de las personas respecto a la inocuidad y calidad de los alimentos que ofrece el mercado, ya que se han descubierto varios químicos de uso agrícola con efectos nocivos para la salud de las personas (Frison & Clément, 2020). Es por esto que hoy en día podemos ver una tendencia de los consumidores hacia dietas más saludables producidas por agriculturas más limpias y sustentables evitando el uso de agroquímicos (Rockström *et al.*, 2017).

Uno de los principales desafíos para el rubro agrícola en la actualidad es disminuir el impacto ambiental generado por la actividad agropecuaria en sistemas productivos que liberan GEI en grandes cantidades. (Lorenz & Lal, 2018). En esta línea, con el objetivo de mantener la calidad de los suelos, se ha revalorizado la práctica ancestral de aplicación de materia orgánica (MO) (fresca, compostada, de origen animal o mixta) a los campos agrícolas como parte de la gestión productiva y de conservación de suelos (García-Franco *et al.*, 2018). Muchos campos han documentado el uso de enmiendas orgánicas obteniéndose resultados muy positivos, como un aumento en los rendimientos de la producción (Zhao *et al.*, 2019), una mayor disponibilidad de nutrientes (Chaturika *et al.*, 2019) y una mejora en propiedades físicas tales como la densidad aparente (Da) y la porosidad (Al-Maliki *et al.*, 2018). Por otro lado, las enmiendas se han utilizado como medida de mitigación del cambio climático, y como promotor del secuestro de C (Powelson *et al.*, 2011), fenómeno que implica la remoción

de CO<sub>2</sub> de la atmósfera por las plantas y almacenamiento de C residual en el suelo (Lal, 2004).

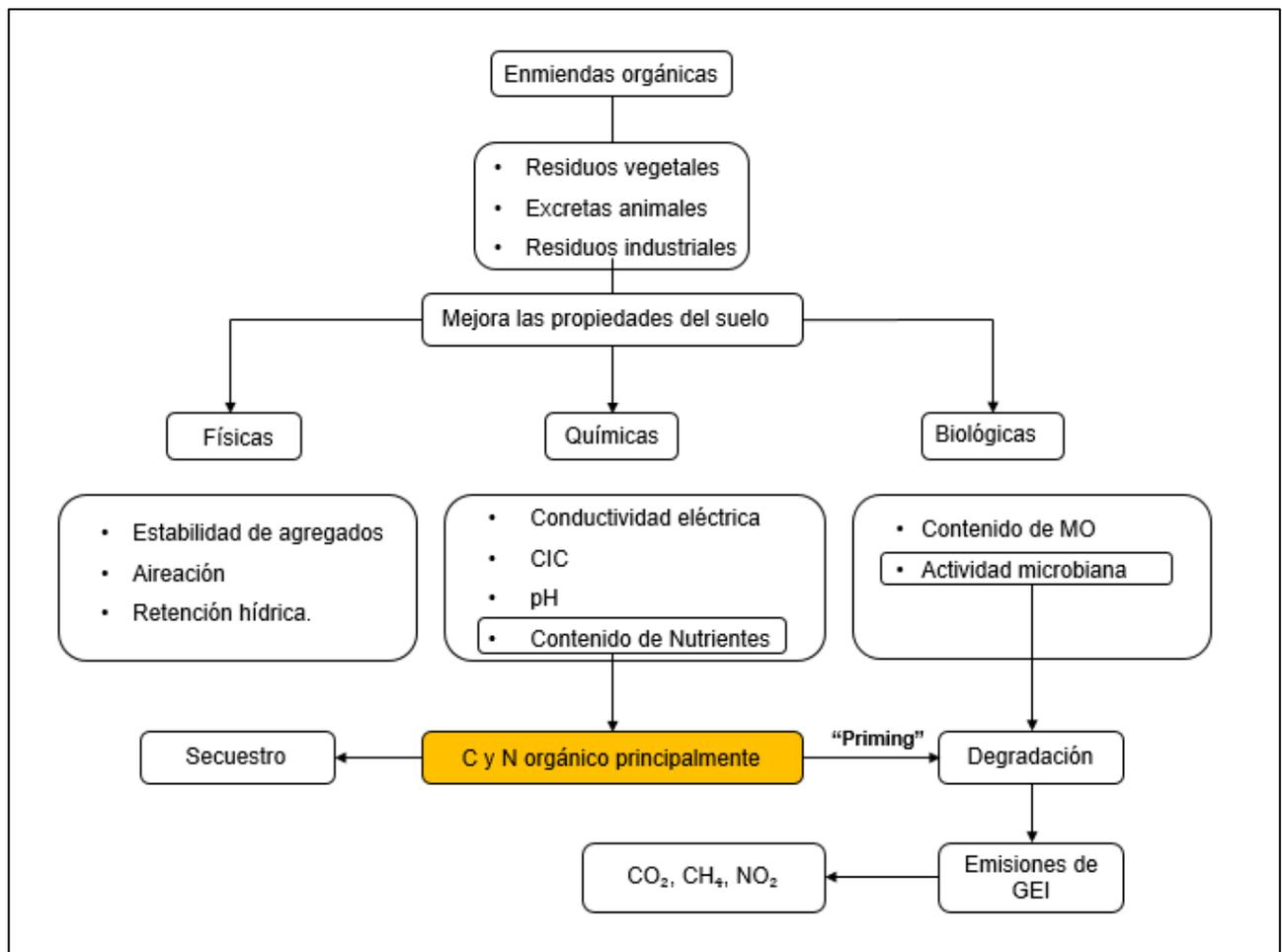
Las enmiendas orgánicas se han propuesto como una medida confiable y efectiva para recuperar la fertilidad de suelos degradados. Esto se debe a los mecanismos de acción que demuestran efectos positivos en las propiedades de los suelos como: un incremento de la actividad microbiana (Melero *et al.*, 2006), mejora de la estructura del suelo (Bronick & Lal, 2005), entrega de nutrientes (Berry *et al.*, 2002), y control de enfermedades producidas por patógenos (Bulluck III *et al.*, 2002) (Figura 1). El principal componente entregado luego de una aplicación de enmienda es la MOS, ya que se relaciona con múltiples funciones ecosistémicas asociadas a las propiedades del suelo (Hoffland *et al.*, 2020) como, proveer sustrato (energía) para la biomasa microbiana (BM) (ciclo de nutrientes en el suelo) (Scotti *et al.*, 2015), promover la formación de agregados, aumentar la capacidad de retención de agua disponible (Bronick & Lal, 2005; Muñoz-Rojas *et al.*, 2016), y favorecer la protección natural frente a patógenos (Cooperband, 2002).

Los microorganismos que habitan en el suelo son los responsables de procesar la MO aplicada y descomponerla, generando distintos resultados en función del tipo de material, sea lábil o recalcitrante, y la cantidad de C en la enmienda, (Ferraz de Almeida *et al.*, 2019), siendo el C lábil una fuente de fácil descomposición para la BM y el C recalcitrante una fuente más estable y difícil de descomponer (Chen & Frank, 2020). Las enmiendas que contienen una mayor proporción de C lábil, al ser mineralizadas rápidamente liberan C como CO<sub>2</sub> a la atmósfera, esto es debido a que entregan energía a los microorganismos a través de nutrientes fácilmente asimilables, mientras que las enmiendas que contienen una mayor proporción de fuentes recalcitrantes de C se mantienen por largo tiempo en el suelo formando parte de su estructura aumentando los reservorios de carbono (Ferraz de Almeida *et al.*, 2019).

Una enmienda orgánica puede variar en su tasa de descomposición provocando una mayor o menor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera según diferentes factores bióticos y abióticos. Las condiciones climáticas (factores abióticos) por su parte, son importantes de considerar en la aplicación de enmiendas, dado que zonas húmedas frías con gran cantidad de biomasa, tienen suelos con un stock de carbono orgánico del suelo (COS) mayor y una tasa de mineralización menor en comparación con zonas de clima seco y caluroso (Willaarts *et al.*, 2016). De esta manera, en regiones semi-áridas (altas temperaturas y bajas precipitaciones) del mundo, ocurre una rápida descomposición de MOS resultando en aumentos del C perdido a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global (Shehzadi *et al.*, 2017). Un factor biótico es el descrito por Fontaine *et al.* (2004) al distinguir dos tipos de microorganismos que difieren en sus estrategias de descomposición, los de estrategia R y los de estrategia K, mediante los cuales producen el “efecto *priming*” de los suelos (Figura 1), definido como el cambio en las tasas de mineralización del C orgánico por un manejo de suelo (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2008). Esta tasa de mineralización puede ser favorecida o limitada dependiendo del sustrato aplicado. Es así como la biomasa microbiana y las tasa de descomposición de la materia orgánica está regulada principalmente por el clima, que determina la actividad

metabólica de los microorganismos, y por las características de los residuos que determinan la cantidad y calidad de las entradas de MOS (Crowther *et al.*, 2019).

Otros factores importantes a destacar son los observados por Serna-Chavez *et al.* (2013), acerca de patrones globales de la incidencia microbiana, el cual concluye que el contenido de agua en el suelo, las propiedades del suelo, y la temperatura son los principales factores que afectan en la cantidad de C microbiano y la relación  $C_{mic}/COS$  (C microbiano vs C orgánico del suelo). Un esquema (Figura 1) puede relacionar los beneficios otorgados mediante la aplicación de una enmienda orgánica y cómo a partir de eso ocurre la respiración microbiana (liberación de  $CO_2$ ) o, por el contrario, secuestro (C se mantiene en el suelo). La revisión bibliográfica va a orientarse en función de las interacciones que involucran al carbono orgánico, dado que es el elemento que tiene mayor incidencia en las características del suelo y se encuentra en altas concentraciones en las enmiendas.



**Figura 1.** Proceso de aplicación de una enmienda orgánica (Basado en Hoffland *et al.*, 2020; Thangarajan *et al.*, 2013).

## **Objetivos**

Este trabajo bibliográfico plantea una búsqueda de estudios científicos, tesis y reportes técnicos actualizados, con el objetivo general de contrastar los efectos benéficos, neutros o negativos de la aplicación de enmiendas orgánicas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos en función del aporte de las enmiendas orgánicas a las emisiones de CO<sub>2</sub>. A partir de esta premisa se plantean otros objetivos específicos:

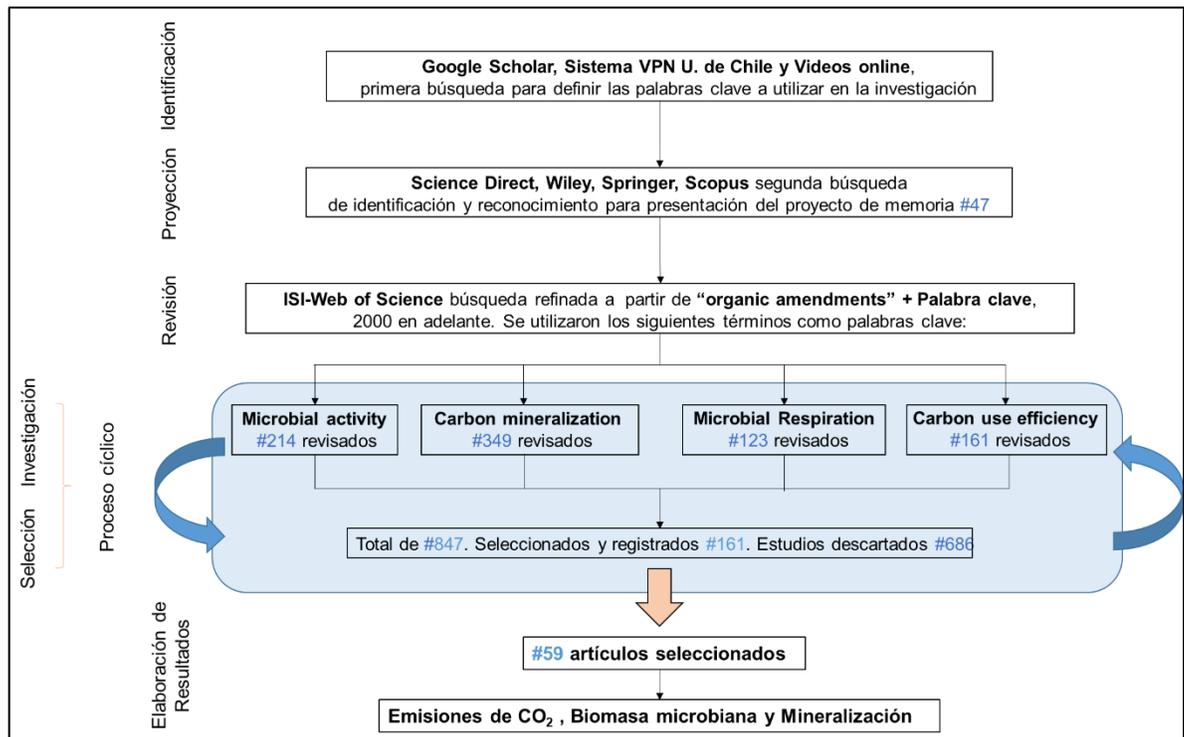
- Revisar bibliográficamente el efecto de aplicaciones de enmiendas orgánicas, en la mineralización del carbono en el suelo y la biomasa microbiana.
- Relacionar las aplicaciones de enmiendas orgánicas y la textura de suelo con el flujo de CO<sub>2</sub> y el secuestro de C del suelo.
- Evaluar las aplicaciones de las enmiendas orgánicas y el balance en las emisiones y secuestro del C en el contexto de un alza de la temperatura.

## METODOLOGÍA

### Criterios y selección de datos bibliográficos

La investigación se enfocó estudios sobre el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas, en la actividad de los microorganismos integrando conceptos como “mineralización”, “eficiencia del uso del carbono” y “respiración microbiana”. Para lo anterior, se evaluaron datos de artículos de revistas científicas revisadas por pares, de la base de datos ISI-Web of Science (<http://apps.newisiknowledge.com>). En esta búsqueda, se consideró todo tipo de enmiendas y se buscó variabilidad en los materiales utilizados para elaborarla. Los estudios considerados contemplan experimentos de campo y laboratorio de modo que la información recopilada permita relacionar y diferenciar variables obtenidas en condiciones ideales o reguladas por el ambiente. Dentro de los criterios de selección se consideró la relación del tipo de enmienda orgánica aplicada, las condiciones climáticas, las propiedades del suelo (MOS, relación C/N) donde se realizaron los estudios y su efecto en la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se enfatizó la búsqueda de documentos con una antigüedad no mayor al año 2000, con el objetivo de acotar el rango de artículos y dar una mirada actualizada que incorpore los últimos avances de las investigaciones que se han realizado entorno a las enmiendas orgánicas.

El objetivo general se desarrolló utilizando el motor de búsqueda de la base de datos ISI-Web of Science a través del método de búsqueda básica (Basic search→ISI-Web of Science) agregando una segunda fila que permite direccionar los resultados en función de dos temas descritos en vez de uno. En cada uno de los filtros se utilizaron en primera instancia las palabras clave “Organic Amendments” como el tema principal. Luego se agregó el segundo tema que tiene por finalidad centrar la búsqueda en información más específica y también reducir la cantidad de resultados. Se organizaron cuatro filtros en total con los siguientes temas: “Microbial respiration”, “Carbon mineralization”, “Microbial activity” y finalmente “Carbon use efficiency”. Por cada filtro, se revisaron 123, 349, 214 y 161 artículos, respectivamente (Figura 2). Las diferencias en el número de artículos para cada categoría se deben a la asertividad y cantidad de resultados arrojados mediante las distintas temáticas. En total se revisaron 847 artículos de los cuales se seleccionaron 161 que se enmarcan dentro de los límites de la investigación propuesta en este trabajo. En los artículos seleccionados, se encuentran estudios realizados en distintos países con predominancia del continente europeo y asiático.



**Figura 2.** Etapas y metodología empleada en la búsqueda y selección de información (Basado en Matus, 2021).

### Sistematización de la información

Se elaboró una tabla en la herramienta de Microsoft Office, Excel tomando en cuenta los 161 artículos anteriores, con el objetivo de registrar y diferenciar la información encontrada en los estudios investigados. Los datos obtenidos fueron ordenados en cinco columnas indicando lo siguiente: “Zona/País”, “Condiciones Climáticas”, “Tipo de Suelo”, “Especies cultivadas” y “Enmienda utilizada”. Cada tópico de columna fue elegido tomando en consideración los rasgos distintivos de cada una. Para los estudios bajo condiciones controladas, en la sección de condiciones climáticas se detallan los parámetros ambientales establecidos en el experimento, temperatura, humedad, día/noche. En el tipo de suelo se hace una reducción a la propiedad textura por ser una variable ampliamente descrita y que se relaciona con propiedades físicas y elección de manejo (Bronick & Lal, 2005). Ensayos donde no se incluyen especies vegetales se antepone el concepto “sin cultivo”.

Con esta metodología, el orden y caracterización de los experimentos permitieron comparar aquellos que presenten similitudes, así como diferenciar aquellos que presenten resultados contradictorios. A pesar de que todos los artículos en tabla evalúan el impacto de enmiendas orgánicas en el suelo, fue necesario realizar una segunda evaluación de su información para

descartar repeticiones u estudios de poca utilidad dado que las condiciones bajo las cuales se realizan y los objetivos perseguidos no permiten establecer comparaciones adecuadas para el análisis y objetivos propuestos en esta memoria.

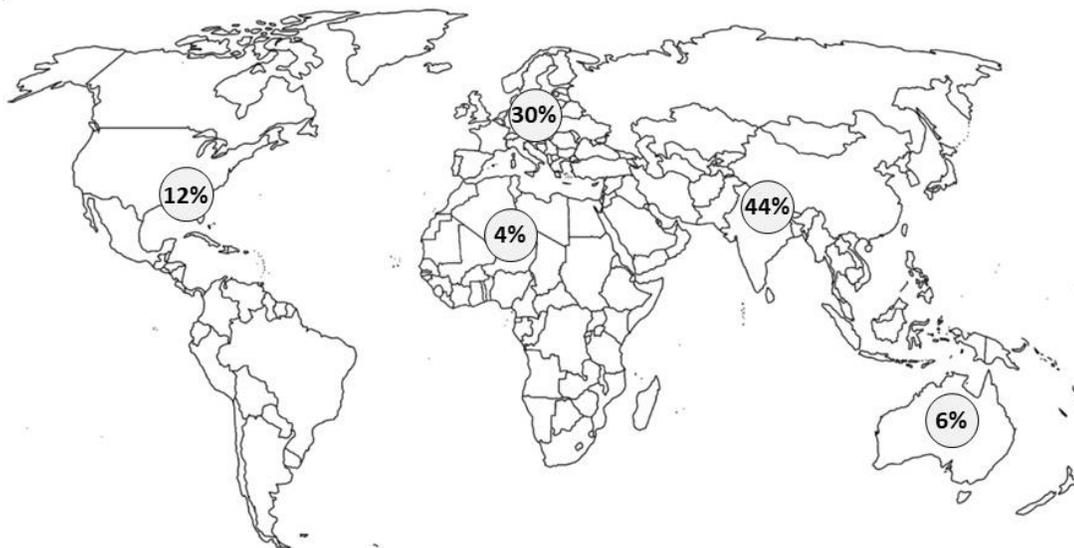
Los objetivos específicos se llevaron a cabo mediante un trabajo de búsqueda y control de calidad de la información donde se realiza una clasificación de los artículos en coincidencia con el uso de enmiendas orgánicas para una mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Esta categorización diferencia publicaciones que siguen la línea de los objetivos planteados relacionando la aplicación de enmiendas orgánicas con modificaciones en emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo y actividad de la biomasa microbiana, de otros artículos que evalúan resultados en interacciones que no son de interés para el análisis en profundidad de esta memoria. En consecuencia, se determinó que 59 artículos cumplen con las condiciones señaladas anteriormente (Figura 2), por lo tanto, sólo aquellos fueron considerados y proporcionan el set de datos necesarios para el desarrollo de este estudio. Como control de calidad de la investigación y por motivos asociados a la discusión, se tomaron en cuenta aquellos artículos que no incluyen los conceptos mencionados en algunos de los resultados con el objetivo de mostrar las tendencias en investigación acerca de enmiendas orgánicas a nivel global.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Orden y caracterización de la información

#### Distribución geográfica y procedencia

La información descrita en 161 artículos científicos que consideran la aplicación de enmiendas orgánicas al suelo buscando una mejora en las propiedades químicas, físicas y biológicas fue contrastada para elaborar la siguiente sección. Mediante el proceso de investigación se obtuvieron estudios variables, si bien en su totalidad hacen alusión a las enmiendas como un método para mejorar las características de los suelos, en varios casos difieren en las propiedades evaluadas y en el tipo de estudio (ensayo de campo o laboratorio). Se encontraron datos de distintos sectores del mundo, al analizar su procedencia, la gran mayoría pertenece a Asia y Europa con un 42 y 30 % de los artículos respectivamente, luego muy por debajo de estos dos con un 12,8% se encuentra América. El resto de la información se reparte entre África y Oceanía con porcentajes menores a un 7 %. De acuerdo a los países que aportaron mayor cantidad de información, China con 37 artículos fue sin duda el mayor, entre otros exponentes que destacaron con un total de 15 artículos por cada uno fueron España, Estados Unidos e India, Australia por su parte también aportó con 10 artículos y luego el resto todos con 6 o menos donde se encuentra, Canadá, Pakistán, Alemania, Francia, Arabia Saudita y Turquía entre otros. En América Latina, predominó Brasil, luego Argentina y Chile, con un total de cinco artículos de los cuales dos pertenecen a Chile. De acuerdo a lo anterior existe mayor investigación en aplicación de enmiendas orgánicas, en Asia y Europa lo que probablemente sugiere que existe un interés por adquirir conocimientos al respecto del tema en ambas zonas. Por otro lado, hay una baja participación de Chile y Latinoamérica, indicando que probablemente es un tema que aún no ha tomado gran relevancia a nivel de continente, pero considerando que las prácticas sostenibles se integran cada vez con más fuerza a las investigaciones en agroecosistemas (Gaitán-Cremaschi *et al.*, 2019) podría tender al aumento dentro de los próximos años.



**Figura 3.** Distribución de los artículos científicos utilizados en esta memoria. Procedencia y origen de la información recopilada.

### Límites establecidos por categorías

Al contrastar la información, se observa que las enmiendas orgánicas empleadas tienen un muy diverso origen destacando: el material vegetal, los residuos industriales, lodos y guano animal. Los métodos y la frecuencia de aplicación también son una variable importante, puesto que los resultados varían al modificar las cantidades aplicadas y el intervalo de tiempo entre cada aplicación. Algunos casos especiales fueron el análisis de mezclas de enmiendas orgánicas conformadas por más de un sustrato en un mismo tratamiento para comparar los efectos respecto de cada enmienda por sí sola y también respecto al control que por lo general es un suelo sin ninguna aplicación (Fungo *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019; Sarma *et al.*, 2017). También se realizan aplicaciones parcialmente orgánicas incorporando fertilizantes inorgánicos junto con la materia orgánica, donde generalmente se obtienen buenos resultados (Ashraf, *et al.*, 2020; Elbl, *et al.*, 2019; Shehzadi, *et al.*, 2017).

La alta variabilidad, permitió elaborar cinco categorías de análisis que reúnen los lineamientos principales y se dividen en: i) Actividad microbiana; ii) Mineralización del C; iii) Rendimiento de cultivo y propiedades físico-químicas del suelo; iv) Rendimiento de cultivo y fertilidad del suelo; y v) Emisiones de CO<sub>2</sub> (Cuadro I). Se incorporaron las seis enmiendas más utilizadas dentro de las cuales biochar y estiércol animal (manure) se posicionan con la mayor cantidad de estudios. La primera es obtenida a partir de una pirólisis que consiste en una descomposición del material residual mediante altas temperaturas en un medio sin oxígeno (Ding *et al.*, 2018), para este efecto se pueden utilizar muchos residuos, lo que explica que sea ampliamente utilizado. El segundo es el estiércol proveniente de animales el cual se utiliza fresco o compostado. La tercera enmienda es abono verde, que

corresponde a la biomasa de plantas en crecimiento que se utiliza para proteger y favorecer el suelo en un periodo donde no se encuentra el cultivo principal (Qaswar *et al.*, 2019; Rothé *et al.* 2019). Finalmente está el compost, una de las enmiendas más populares constituida a partir de residuos orgánicos de diversos orígenes conformando una pila, la cual es degradada por medio de la descomposición microbiana y el aumento de la temperatura al interior, que forma un sustrato estable a la descomposición y alto en materia orgánica (Siedt *et al.*, 2021). A las enmiendas ya mencionados se suman tres enmiendas que participan en cantidades similares: Rastrojos vegetales (Straw), basado en la incorporación de restos vegetales picados al suelo (Khan *et al.* 2019), vermicompost, que se entiende como un sistema de compostaje en base a lombrices introducidas (Yupeng *et al.* 2018) y los lodos industriales (sewage sludge) que son remanentes de las industrias depuradoras de aguas (Husnu *et al.*, 2019).

**Cuadro 1.** Número de artículos revisados para cada temática y enmiendas orgánicas utilizadas en cada caso. Cada fila corresponde a un tema diferente. Las casillas destacadas son los temas tratados en esta memoria.

Tema	Artículos Nº #	Enmiendas (%) <sup>*</sup>					
		Biochar	Compost	Estiércol	Rastrojos	Vermicompost	Residuos industriales
Rendimiento de cultivo y fertilidad del suelo	21	11	8	7	6	0,0	1
Rendimiento de cultivo y propiedades fisicoquímicas del suelo	44	14	22	16	5	3	7
Actividad microbiana	56	15	12	16	6	2	2
Mineralización del C	16	7	3	5	3	2	1
Emisiones de CO <sub>2</sub>	10	7	3	6	1	0	0
Descartados	14	0	0	0	0	0	0
Total	161	54	48	50	21	7	11

\* Las numeraciones por fila no equivalen al número total de artículos, debido a que algunos artículos utilizan más de una de las enmiendas descritas en el cuadro.

### **Efecto de las enmiendas orgánicas en la mineralización y biomasa microbiana**

Entre otros beneficios, los residuos orgánicos actúan no solamente como fuente de nutrientes sino que también como promovedores de la cantidad, actividad y biodiversidad de los

microorganismos presentes en el suelo (Mekki *et al.*, 2019), afirmación que es confirmada en el Cuadro 2 donde la totalidad de las enmiendas orgánicas mencionadas producen un incremento de la biomasa microbiana. Luan *et al.* (2020) refuerzan lo anterior al plantear que la variación en la composición microbiana del suelo y el COS se atribuye en un 92 % a los cambios en las características del suelo producidos por enmiendas orgánicas. En términos de actividad enzimática se puede observar que indistintamente del tipo de enmienda el efecto es positivo (Cuadro 2), en la misma línea, diversos autores adhieren a lo anterior al obtener que enmiendas de biochar, compost, rastrojos de cultivo y estiércol animal favorecen el funcionamiento enzimático al ser entregadas al suelo (Sarma *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Elbl *et al.*, 2019; Fang *et al.*, 2020; X. Wang *et al.*, 2021).

**Cuadro 2.** Efecto de la aplicación de distintas enmiendas orgánicas en la mineralización de la materia orgánica, la biomasa microbiana del suelo y la actividad enzimática del suelo.

Enmiendas	Mineralización	B. microbiana	Act. enzimática
Compost	+	+	+
Biochar	+ / -	+	+
Estiércol	+	+	+
Rastrojos	+	+	+

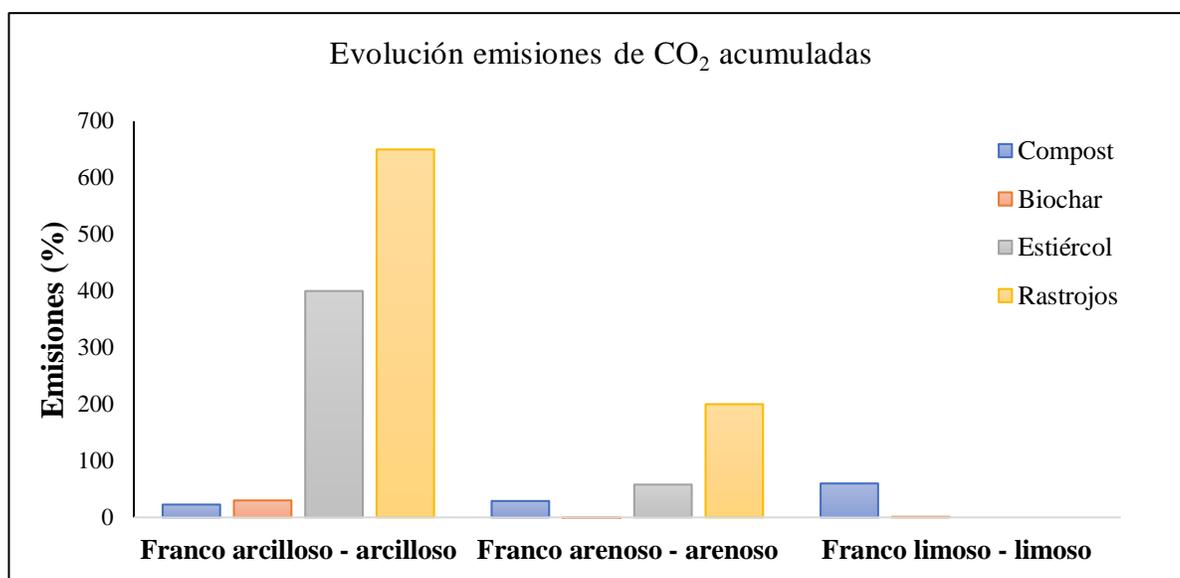
La promoción del desarrollo de los microorganismos y su actividad es ciertamente una característica positiva. Sin embargo, con la entrega de MO al suelo ocurren procesos inevitables de descomposición por acción de microorganismos generando así, la liberación de CO<sub>2</sub> (gas de efecto invernadero), el cual en exceso constituye un contaminante (Britt *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2021). En efecto, las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas aumentan significativamente con la adición de enmiendas orgánicas (Sarma *et al.*, 2018). Al aplicar una enmienda el secuestro del C en el suelo depende de varios factores: Cantidad y calidad de la enmienda, momento de aplicación y frecuencia, temperatura del suelo, régimen hídrico, textura del suelo, manejo de fertilizantes y sistema de rotación de cultivos (Li *et al.* 2019).

En cuanto a la mineralización del C, aplicaciones de fertilizantes minerales nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K) no producen un efecto significativo, por el contrario, enmiendas orgánicas tienen un efecto benéfico al aumentar la mineralización a partir de un incremento en la actividad microbiana (Nisar *et al.*, 2020). Esto coincide con los resultados de la investigación donde todas las enmiendas presentaron un efecto positivo en la mineralización aumentando la tasa a excepción del biochar, que por lo general presenta un efecto *priming* negativo en el suelo (disminución de la respiración de la MO nativa del suelo) (Cuadro 2).

## Emisiones de CO<sub>2</sub> en relación al tipo de enmienda y factor suelo

Para el desarrollo de este capítulo se dispuso de 25 artículos que integran estudios en condiciones de campo y laboratorio. De acuerdo a la información se observó que el aporte a las emisiones de CO<sub>2</sub> en general es muy variable, por esto se decidió evaluar la influencia de los factores textura de suelo y tipo de enmienda, en la variabilidad de la cantidad de emisiones, dado que caracterizan a la gran mayoría de los artículos.

Las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> aumentan en mayor proporción al aplicar enmiendas en base a rastrojos de cultivo en suelos arenosos y arcillosos (Figura 3). Todas las enmiendas orgánicas evaluadas inducen un aumento de emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub>, esto se atribuye a la adición de fuentes de C de rápida degradación microbiana (Sarma *et al.*, 2018). En suelos arcillosos se obtuvo los valores más altos de emisiones encabezados por enmiendas de rastrojos y estiércol. El estiércol animal difiere fuertemente en el nivel de emisiones al comparar suelos de textura arcillosa con suelos arenosos (Figura 3).



**Figura 4.** Porcentaje de aumento o disminución de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) acumuladas, al comparar aplicaciones de enmiendas orgánicas con un control. En un período de 120 días se elaboran los resultados a partir de cuatro enmiendas: compost, biochar, estiércol fresco y rastrojos de cultivos bajo 3 texturas de suelo: Franco arcilloso a arcilloso, Franco arenoso a arenoso y Franco limoso a limoso.

Las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> indican un orden decreciente de respiración microbiana en las enmiendas de Rastrojos > Estiércol > Compost > Biochar (figura 4). Observándose en el caso de biochar una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> en suelos arenosos. Estos

resultados demuestran que la aplicación de biochar proporciona una mayor estabilidad del C en el suelo favoreciendo el secuestro de este elemento (Qayyum *et al.*, 2017).

El compost aplicado al suelo presenta el mayor aumento de emisión acumulada de CO<sub>2</sub> en suelos limosos, luego en suelos arenosos disminuye y finalmente alcanza su mínimo en suelos arcillosos (Figura 3). Entre los suelos analizados, en suelos arcillosos se observa una mayor emisión de CO<sub>2</sub> acumulado en el tiempo (Marzi *et al.*, 2020). El análisis no contempla el efecto de las enmiendas de rastrojos y estiércol en suelos limosos, dado que no se encontraron estudios que avalaran resultados en estos suelos. Estos gráficos indican que la textura de los suelos influye de manera visible en las emisiones de CO<sub>2</sub> (Figura 3) (Tang *et al.*, 2021; Shen *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020; Ghimire *et al.*, 2017; Lal Meena *et al.*, 2020).

### Efecto del aumento de temperatura por CC en las emisiones de CO<sub>2</sub>

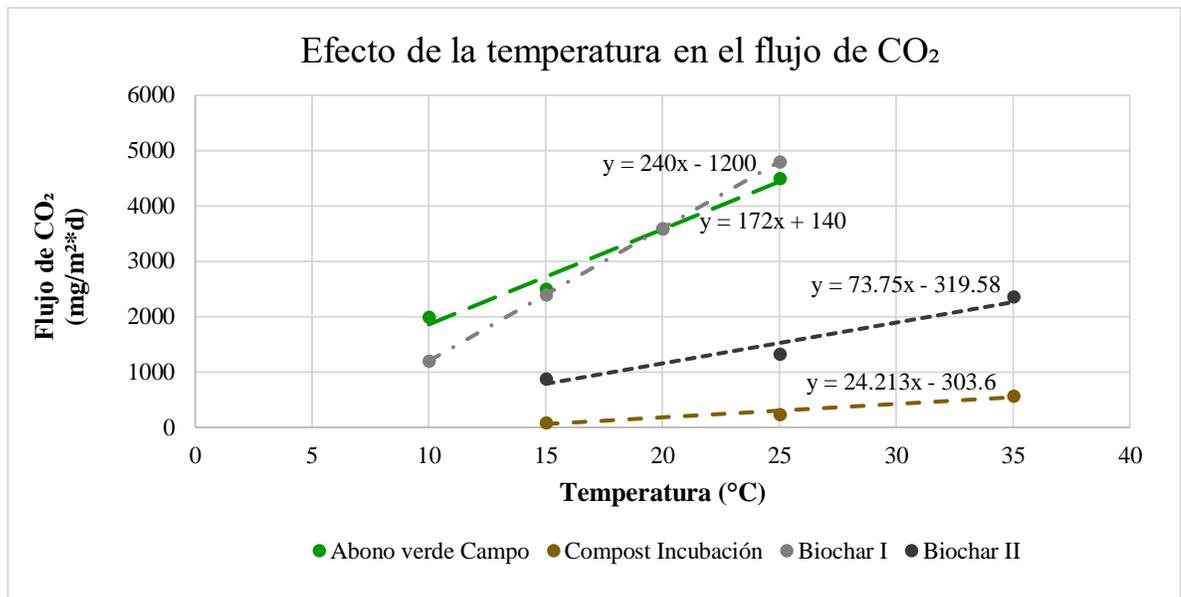
La temperatura es un factor que participa activamente en el proceso de degradación de los residuos orgánicos, interviniendo en la respuesta de los microorganismos por medio de la aceleración de la actividad enzimática responsable de la respiración del suelo. Escasos artículos ahondan en la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> bajo distintos niveles de temperatura luego de aplicaciones de enmiendas orgánicas (Cuadro 3) (Forte *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Reddy y Crohn, 2019). Cada estudio presenta diferentes condiciones para la realización de los experimentos. El biochar fue aplicado en climas tropical y semi-árido, el abono verde en un clima mediterráneo y finalmente el estiércol que se analizó bajo condiciones controladas en laboratorio.

**Cuadro 3.** Caracterización de los artículos incorporados en los resultados obtenidos respecto al efecto de la temperatura en el flujo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Enmiendas	Tipo de estudio	Tipo de suelo	Condiciones
Biochar I	Campo	Franco arenoso	Clima subtropical, en arrozales
Biochar II	Campo	Franco limoso	Clima semi-árido, en maizal
Abono Verde	Campo	Franco areno arcilloso	Clima Mediterráneo, en maizal
Estiércol	Incubación	Salino sódico	Controladas

En la Figura 5, se aborda el efecto de la temperatura en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera luego de aplicaciones de las enmiendas señaladas en el Cuadro 3. En todas las enmiendas se observa una tendencia ascendente del flujo de CO<sub>2</sub> en función al aumento de la temperatura, aunque en distintas proporciones. Considerando el rango entre 15 y 25 °C de temperatura el valor de la pendiente para los cuatro casos analizados se ordena de la siguiente manera: Biochar I > Abono verde > Biochar II > Compost (Figura 5). Biochar I y II esbozan

diferencias en el comportamiento de las emisiones a pesar de corresponder a la misma enmienda, esto sugiere que existe alta incidencia de factores externos como suelo y temperatura en el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>. Intersección de las rectas pertenecientes a Abono verde y Biochar I a 20°C, indica que el nivel de flujo es igualado a esa temperatura. Las emisiones de CO<sub>2</sub> de la enmienda de compost fueron mínimamente afectadas por el factor temperatura, debido a que el valor máximo alcanzado por la enmienda a 35°C, se encuentra por debajo del nivel de emisiones del resto de las enmiendas a una temperatura de 15°C, lo que resulta en 20°C de diferencia que no fueron determinantes en el alza de emisiones (Figura 5). De la misma manera, biochar II a una temperatura de 35°C tiene un flujo menor que abono verde y biochar I a una temperatura de 20°C (Figura 5). Independientemente de la enmienda aplicada, se obtuvo una relación positiva entre el aumento de la temperatura y el flujo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.



**Figura 5.** Evolución del flujo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en función del aumento gradual de la temperatura luego de aplicaciones de enmiendas orgánicas. Biochar I corresponde al estudio en un suelo franco arenoso y Biochar II corresponde al estudio en suelo franco limoso.

Utilizando la información de la Figura 5, se estimó la sensibilidad a la temperatura a partir del cociente térmico (Q10), que hace referencia a la dependencia de un proceso biológico a la temperatura. Se define como la variación existente en la tasa de una reacción al aumentar en 10 °C la temperatura. La ecuación que permite calcular el coeficiente es la siguiente:

$$\left(\frac{RT_2}{RT_1}\right)^{\frac{10}{T_2-T_1}} \quad (\text{Ec.1})$$

donde  $RT_2/RT_1$  es el cociente entre las tasas inicial y final en este caso de flujo de  $CO_2$  en  $mg/m^2$  de suelo\*día y;  $T_2$  y  $T_1$  la temperatura final e inicial respectivamente. El valor más alto obtenido corresponde a 3,0 para la enmienda de compost bajo incubación y el menor valor corresponde a 1,7 para el caso del biochar II. Para el cálculo de la diferencia de temperatura se consideraron las temperaturas mínimas y máximas alcanzadas por cada una de las curvas es por eso que hay diferencias en este parámetro.

**Cuadro 4.** Valores obtenidos de sensibilidad térmica respecto a tres enmiendas orgánicas. Estos valores fueron estimados a partir de la ecuación 1.

Enmiendas	Valor ( $q_{10}$ )	$\Delta T^\circ C$	$RT_2/RT_1$
Biochar I	2,5	15	4,0
Biochar II	1,7	20	2,9
Abono verde	1,8	15	2,0
Compost Incubación	3,0	20	9,1

### **Efecto de las enmiendas en la biomasa microbiana y mineralización del carbono**

#### **Efecto en la biomasa microbiana**

De acuerdo a los resultados obtenidos, las cuatro enmiendas orgánicas evaluadas tienen efectos positivos en la biomasa microbiana del suelo (Cuadro 4), los cuales van a ser discutidos en este apartado.

Aplicaciones de enmiendas en base a compost, estiércol fresco o rastrojos se caracterizan por generar un aumento en la biomasa microbiana de C, el C orgánico particulado y la respiración del suelo (Sarma *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Shahzad *et al.*, 2021), mientras que biochar afecta la composición microbiana promoviendo una mayor riqueza y diversidad de microorganismos en suelos, sin embargo, no siempre incide en la biomasa microbiana, debido a que limita la cantidad de componentes disponibles para los microorganismos (Li *et al.*, 2019). Probablemente, la gran cantidad de material orgánico disponible para los microorganismos por parte del compost, estiércol y rastrojos permite que las funciones anteriores puedan ser mejoradas mediante su aplicación. Estudios respecto al uso de enmiendas orgánicas en aplicaciones conjuntas con fertilizantes químicos (N-P-K), registran resultados positivos en los cuales se observa que, mediante esta práctica la mejora en las propiedades microbianas mencionados anteriormente es de una magnitud mayor que al aplicar enmiendas orgánicas por si solas. En compost y estiércol se observan mejores resultados de aumento de biomasa microbiana y respiración celular al mezclar fertilizantes químicos con las enmiendas que al aplicarlas sin ellos. El uso de esta práctica en biochar se ha visto que favorece la actividad enzimática (Sarma *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018; Kaur *et*

*al.*, 2019; Ashraf *et al.*, 2020; Luan *et al.*, 2020). La eficiencia de tratamientos con fertilizantes químicos en conjunto con enmiendas orgánicas tiene relación con el aumento de la cantidad de nutrientes entregados al suelo a partir de los cuales los microorganismos pueden nutrirse y realizar sus funciones de manera más eficiente al tenerlos disponibles.

Al igual que las otras enmiendas biochar también propicia el incremento de biomasa microbiana y la actividad enzimática a nivel de la rizósfera (Chen *et al.*, 2019; Amadou *et al.*, 2020), lo que puede relacionarse con el incremento que provoca la enmienda en la cantidad de micorrizas arbusculares (AMF), responsables de aumentar cerca de un 19% la biomasa microbiana del C (Xu *et al.*, 2020). Un correcto funcionamiento de los microorganismos en el suelo y posterior aumento de su biomasa luego de aplicar una enmienda orgánica requiere de un estado de equilibrio en la relación C/N de los residuos que la componen (USDA, 2011). Componentes con baja relación C/N son de fácil y rápida degradación por microorganismos, mientras que una alta relación C/N implica una lenta degradación (Alagöz *et al.*, 2020). Los microorganismos del suelo para mantenerse vivos y activos requieren de una relación entre la cantidad de C y N en su cuerpo de de 24/1, por lo que un exceso ya sea de C o N respecto a esta proporción causa un desequilibrio que tiene como consecuencia un aumento o disminución en la velocidad de la degradación de residuos. Los microorganismos siempre buscarán volver al equilibrio, lo que en varios casos puede ser un proceso que incide en el tiempo de degradación de la materia orgánica (USDA, 2011).

La condición de los suelos puede modificar el efecto de las enmiendas en la biomasa microbiana, dado que se ha observado que suelos en los que existe un exceso de materia orgánica o suelos que presentan una alta fertilidad los efectos en el aumento de la biomasa microbiana de C se ven disminuidos (Sheng & Zhu, 2017; Liu *et al.*, 2020). Suelos en esas condiciones usualmente no requieren de la utilización de enmiendas orgánicas porque se asume que la carga microbiana es considerable y los niveles de materia orgánica ya son suficientemente altos, bajo ese contexto es esperable que la intensidad de los efectos disminuya. Esto se encuentra estrechamente relacionado con la dosis de la enmienda aplicada, numerosos estudios argumentan que aumentos en la dosis de la enmienda orgánica aumenta a su vez el efecto en microorganismos y en los sub grupos de microorganismos (Anjum & Khan, 2020)(Li. *et al.*, 2019). La fertilidad del suelo y contenido de materia orgánica son entonces factores importantes a la hora de considerar una dosis de enmienda orgánica, lógicamente un suelo que presente baja fertilidad y un contenido muy bajo de materia orgánica va a requerir dosis más altas de aplicación para mejorar la condición del suelo.

A modo general, las aplicaciones de enmiendas orgánicas resultan en un aumento de la población, diversidad y actividad microbiana y por ende un aumento también en la mineralización del C (Marzi *et al.*, 2020; Lal Meena *et al.*, 2020).

## Mineralización de la materia orgánica

El proceso de descomposición de la materia orgánica depende fuertemente de la actividad de los microorganismos, lo que permite que ocurra la mineralización de los compuestos. Las diferencias en el C mineralizado son determinadas en mayor medida por la cantidad de residuo más que por el tipo del residuo, por tanto la actividad microbiana en gran parte está determinada por la dosis (Ghimire *et al.*, 2017). Es importante entender dos conceptos implicados en el análisis siguiente, respiración basal, definida como el valor promedio de CO<sub>2</sub> liberado en un período de incubación y  $q\text{CO}_2$  entendido como el cociente entre el valor promedio de la respiración basal y la biomasa microbiana del suelo (Li *et al.*, 2019).

El suministro de MO en base a compost en forma de vermicompost (Elbl *et al.*, 2019) o “bio-compost” demuestra no tener una relación directa con la dosis aplicada, esto se debe a que en incubación, dosis compuestas por 1/2 y 1/4 (partes de suelo/partes de enmienda) la estimulación de la actividad microbiana fue menor en comparación a dosis de 1/8 (Mekki *et al.*, 2019). Por el contrario, al emplear altas dosis de biochar (12 t ha<sup>-1</sup>), se registra un aumento superior de respiración basal y  $q\text{CO}_2$  respecto a 6 y 2.4 t ha<sup>-1</sup>, esto se debe al incremento de la actividad microbiana a causa de una mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes entregados al suelo elevando la dosis (Li *et al.*, 2019). Otros autores encontraron resultados opuestos asegurando que la tasa de respiración del suelo, el CO<sub>2</sub> acumulado y el  $q\text{CO}_2$  disminuyen al aplicar biochar al suelo (Chen *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Estos efectos contradictorios indican que la dosis de enmienda no está directamente relacionada a la actividad microbiana, por lo tanto, es necesario determinar previamente qué nivel de dosis es el más adecuado para el funcionamiento de los microorganismos (Chen *et al.*, 2019; Mekki *et al.*, 2019).

El comportamiento de biochar en el suelo promueve fuertemente el secuestro de C, mejora la fertilidad, y presenta una estabilidad en el suelo durante miles de años, esto lleva a que se considere como una buena alternativa a la hora de contribuir con la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (Xu *et al.*, 2021). En ocasiones se ha visto que aplicaciones de biochar pueden aumentar la mineralización del C en el tiempo, pero esto va a depender de las propiedades de los residuos utilizados (De Carvalho Junior *et al.*, 2019). A diferencia de otras enmiendas como rastrojos de trigo caracterizada por ser fuente lábil de carbono, biochar disminuye la mineralización del CO y entrega formas de C más estables en el suelo (Liu *et al.*, 2020).

El uso de mezclas ya sea a partir de material orgánico o fertilizantes inorgánicos tiene efectos diversos en la mineralización de la MO. Dada una condición de suelo no enmendado, la entrega de compost enriquecido con fertilizante nitrogenado (urea) disminuye la tasa de mineralización del suelo en ciertos rangos de tiempo, por ende el total acumulado presenta valores muy similares para ambos casos (Yang *et al.*, 2021). Combinaciones de enmiendas orgánicas confiere una mayor diversidad de elementos al sustrato elaborado resultando en una mejora de las propiedades del suelo, actividad enzimática y rendimiento de la planta (Li *et al.*, 2019). Si por ejemplo se busca aumentar la mineralización de un suelo se debe considerar que un estiércol presenta una tasa de mineralización mayor que compost (Nisar *et*

*al.*, 2020) de esta manera se puede incidir en la mezcla para obtener mejores resultados en base a las características de los materiales seleccionados. Así mismo con otros parámetros, el nivel de COS al final de una temporada sujeta a aplicaciones de mezclas de urea y enmiendas orgánicas, aumenta para el caso de mezclas que contienen rastrojos de trigo y mezclas de compost con biochar en distintas proporciones de acuerdo a los materiales empleados (Yang *et al.*, 2021).

El comportamiento de la mineralización en el tiempo inicia con un gran crecimiento de emisiones en los primeros días tras una aplicación de enmienda y a lo largo del tiempo se va estabilizando, creciendo cada vez más lentamente dado que la descomposición de compuestos orgánicos ya se encuentra más avanzada. Abonar N mineral influye en la eficiencia de mineralización de los microorganismos en este caso de C, mientras mayor sea el contenido de N mineral mayor es la eficiencia de uso del C en el suelo, por tanto suelos con bajo contenido de N tienden a disminuir la eficiencia de uso del C (Liu *et al.*, 2020). La fertilidad del suelo también cumple un rol importante en el coeficiente metabólico microbiano siendo mayor en suelos de baja fertilidad y menor en suelos de alta fertilidad producto de que en los primeros se utiliza una mayor cantidad de C para respirar que para crecer (menor eficiencia metabólica), esta es la causa de un mayor efecto *priming* negativo en suelos de baja fertilidad (Liu *et al.*, 2020).

Otros factores a considerar responsables de variaciones en la respiración y mineralización del suelo son los climáticos, temperatura, tipo de suelo, humedad, entre otros de tal manera que mientras mayor es esta última, mayor es la respiración (Jiang & Yu, 2019).

### **Efectos de enmiendas orgánicas y suelos en el flujo y emisiones de CO<sub>2</sub>**

La respiración del suelo inducida por sustrato (enmienda) es sustantivamente mayor en mezclas de vermicompost con fertilizantes minerales que en suelos no enmendados. Sin embargo en suelos franco arenosos, no existen efectos significativos de las aplicaciones de compost y vermicompost por si solas en materia de actividad respiratoria (Elbl *et al.*, 2019). Compost de estiércol de granja y de biochar actúan de manera contraria respecto al “efecto *priming*” neto, dado que altas cantidades del primero aumentan el efecto *priming* (*priming* positivo) y altas cantidades del segundo disminuyen el efecto *priming* (*priming* negativo). A una misma proporción de ambas enmiendas el *priming* neto alcanza un valor cero (Qayyum *et al.*, 2017). Mezcla de residuos bio-compost (estiércol de pollo, abono verde, lodos de fluidos de oliva) por su parte influye directamente aumentando las emisiones de CO<sub>2</sub> acumulado en todas sus dosis con respecto a un suelo sin enmienda. Por otro lado, un aumento de la dosis aplicada tiene un comportamiento desacelerado en función de la degradación del CO, es decir, mientras mayor es la dosis de bio-compost la degradación de la enmienda es más lenta (Mekki *et al.*, 2019)(textura arenosa).

Respecto a biochar, el material fresco demostró ser más eficiente que uno almacenado dado que, aumentó el flujo de CO<sub>2</sub> desde el suelo en un 53,9 % en comparación a un suelo sin biochar que alcanzó solamente un 20,9 %, mientras que el almacenado mantuvo valores bajos (Liu *et al.*, 2019). Las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de suelos con biochar a modo general se observan menores por unidad de C independiente del uso de suelo (bosques o suelos cultivados) y del contenido de agua en el suelo (Shen *et al.*, 2017; Hardy *et al.*, 2019; Walkiewicz *et al.*, 2020). A diferencia de lo anterior un biochar a base de residuos de tabaco mostró un aumento generalizado de las emisiones de CO<sub>2</sub> y sólo en algunas ocasiones esta fue menor a un suelo sin aplicación. Esto lo evidencia mediante el promedio diario de emisiones de CO<sub>2</sub> el cual aumentó significativamente en todas las dosis (Tang *et al.*, 2021). En conjunto con fertilizantes minerales, las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron mayores para los tratamientos que involucraron mezclas de una dosis de biochar y dos dosis de urea respecto a aquellos que utilizaron únicamente el biochar (Shen *et al.*, 2017; S. Li *et al.*, 2019; Walkiewicz *et al.*, 2020). En suelo con altos contenidos de hierro disponible, el biochar aumenta significativamente las emisiones totales de CO<sub>2</sub> independiente de la dosis, mientras que, en un suelo alcalino el biochar tuvo un efecto supresor de las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual solo aumentó al incrementar las dosis de biochar. Dándose a entender que las aplicaciones de biochar en estos suelos (generalmente de pH ácido) aceleran la mineralización facilitando el efecto *priming* positivo, pero en función del tiempo esta tendencia cambia y el efecto *priming* comienza a ser negativo, excepto con dosis altas (Sheng & Zhu, 2017).

Enmiendas de estiércol también presentan diferencias, el estiércol de ovinos presenta una mayor emisión acumulada de CO<sub>2</sub> en comparación con el estiércol de vacuno independiente del suelo analizado (Marzi *et al.*, 2020). Siendo un punto en común, la forma de entrega de estiércol, la cual influye en las emisiones de CO<sub>2</sub> de tal manera que al incorporar los residuos al suelo enterrados se obtienen menos emisiones que al depositarlos en la superficie donde la mineralización es mayor (Lal Meena *et al.*, 2020).

Los tratamientos integrados (orgánico + inorgánico) crean un ambiente favorable para el desarrollo de microorganismos y entregan sustrato para el proceso de mineralización. El coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ), indicador de la eficiencia de los microorganismos en procesar los residuos orgánicos o el C disponible (Kaur *et al.*, 2019), disminuye al aplicar estiércol y tratamientos integrados. Al predominar el C recalcitrante en un sustrato como el biochar, se exhiben valores más altos de  $qCO_2$  indicando energéticamente una menor eficiencia de las comunidades microbianas (Kaur *et al.*, 2019). En ocasiones la combinación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos obtiene mejores resultados que aplicaciones únicamente orgánicas en el COS (Sarma *et al.*, 2017). Tratamientos ya sea sólo con estiércol o agregando material inorgánico aumentan el CO<sub>2</sub> acumulado, pero el potencial de la mineralización del CO aumenta significativamente en tratamientos integrados, contrastando con aplicaciones de estiércol sin otra enmienda (Ashraf *et al.*, 2020).

Los rastros de cultivo aumentan la variabilidad de las comunidades microbianas y promueven la actividad enzimática lo que entrega como resultado un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> (Fang *et al.*, 2020). Estas emisiones de CO<sub>2</sub> se ven fuertemente modificadas por el tipo de enmienda orgánica utilizada y el tiempo de incubación, siendo un

factor relevante una alta proporción de C lábil en los residuos ya que entrega un mayor efecto *priming* positivo (Wang *et al.*, 2020). El C mineralizado es significativamente mayor al incorporar los rastrojos al suelo y la tasa de descomposición del C junto con el pool de C lábil son dependientes de la cantidad y tipo de rastrojo incorporado (Ghimire *et al.*, 2017). Es así, como una alta relación C/N de los residuos entregados al suelo aumenta la mineralización y liberación de CO<sub>2</sub> (Li *et al.*, 2019) respecto a un suelo sin aplicación, pero en menor medida que una enmienda con una menor relación C/N.

En resumen, la aplicación de enmiendas orgánicas por lo general aumenta significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el suelo. Esto demostrado en compost en base a guano de gallina (Li *et al.*, 2018), o con aplicaciones de estiércol, rastrojos de cultivo, compost y vermicompost (Sarma *et al.*, 2018; De Carvalho Junior *et al.*, 2019; Mekki *et al.*, 2019), la intensidad de este efecto va a depender en gran parte del contenido de C lábil de los materiales y su relación C/N.

### **Efecto del aumento de temperatura en las emisiones de CO<sub>2</sub>**

Los modelos globales de CC proyectan un aumento de la temperatura producto de esta crisis climática, condición que está fuertemente correlacionada en el proceso de degradación de residuos orgánicos, considerando que la temperatura es el factor abiótico de mayor incidencia en los cambios estacionales de la respiración del suelo (Shen *et al.*, 2017). Existe una relación positiva entre el aumento del flujo de CO<sub>2</sub> y la temperatura (Forte *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Reddy y Crohn, 2019), mientras más aumenta esta última, el flujo de CO<sub>2</sub> liberado luego de la aplicación de una enmienda también aumenta. Tal como se observa en la figura 5, todas las enmiendas aplicadas siguen una tendencia ascendente de aumento progresivo de las emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la temperatura, esto se atribuye a un aumento en la actividad microbiana (Reddy & Crohn, 2019).

Por su parte, el biochar tiende a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el largo plazo debido a que corresponde a una fuente recalcitrante de C, pero al aumentar las temperaturas en el corto plazo la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> también aumenta (Yeatman, 2014; Shen *et al.*, 2017). En la tendencia, se registraron dos valores de flujo a temperaturas de 15 y 25°C. Se debe tener en consideración que los datos correspondientes a las menores tasas de flujo de CO<sub>2</sub> provienen del estudio realizado bajo un suelo de clase textural franco arenosa en clima subtropical. El abono verde al contrario del biochar II posee gran cantidad de carbono lábil disponible de rápida descomposición para los microorganismos, característica que confiere altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> y permitió obtener valores muy similares a los registrados para biochar I. El estiércol fue evaluado en condiciones de laboratorio, por lo que sus valores obtenidos no incorporan todas las variables y flujos del ambiente como es el contenido de agua del sistema o los microorganismos del suelo, actores fundamentales de la descomposición de los residuos y la mineralización de la MO.

Los valores de Q10 reflejan que las variaciones en el flujo de CO<sub>2</sub> son atribuidas mayormente a la temperatura en el caso del estiércol, luego en menor medida al biochar y finalmente al abono verde (Cuadro 4). De esta manera, a medida que aumenta la temperatura en 10 °C la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> del suelo se incrementa en la cantidad de veces que indica el valor del coeficiente calculado. La calidad del material aplicado como enmienda es un factor clave que influye en el valor que se obtendrá de sensibilidad térmica (Chen *et al.*, 2019), siendo las fracciones recalcitrantes las de mayor sensibilidad térmica, (Davidson & Janssens, 2006). Esto se explica porque la velocidad de descomposición en la incubación está afectada por el Q10 de los microorganismos y siendo el estiércol principalmente materia orgánica lábil se descompone más rápido, mientras que en enmiendas orgánicas como en el biochar o el abono verde existe una mayor cantidad de material recalcitrante el cual al aumentar la temperatura queda disponible para la descomposición, en otras palabras a mayor temperatura existe mayor cantidad de material posible de descomponer por parte de los microorganismos.

## CONCLUSIONES

Mediante esta revisión bibliográfica se evidencia que investigaciones provenientes de todos los continentes del mundo respaldan de manera importante los beneficios otorgados por enmiendas orgánicas principalmente de compost, biochar, estiércol, abono verde y rastrojos a suelos agrícolas. Entre los beneficios destaca el aumento en: Actividad enzimática, biomasa y actividad microbiana del suelo, la cuales inciden en el funcionamiento de la micro biota del suelo. En contraste, uno de los efectos no deseados es el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que priorizar la utilización de biochar caracterizada como una enmienda promotora del secuestro de C, evaluar la relación C/N de los materiales y cuantificar la cantidad de carbono lábil son manejos efectivos para controlar el exceso de emisiones.

Para una aplicación óptima de una enmienda orgánica una de las propiedades del suelo que se debe considerar es la textura del suelo, ya que demostró ser un factor que incide de manera importante en la cantidad de emisiones. Un suelo con dominancia de partículas en el tamaño arcilloso potencia las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con suelos donde dominan partículas de tamaño limo y arena.

La temperatura del suelo juega un papel fundamental en la actividad microbiana del suelo y por ende en la descomposición de la materia orgánica. En este estudio se evidenció una relación directa entre el aumento de temperatura y las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera una de las principales causas de inestabilidad del sistema agrícola al aplicar una enmienda orgánica. De las enmiendas analizadas compost es la que responde más fuertemente a cambios en la temperatura, luego biochar I y finalmente biochar II y abono verde.

El uso de mezclas, ya sea de enmiendas orgánicas o complementadas con fertilizantes minerales constituye una alternativa capaz de reforzar los efectos benéficos de aplicaciones orgánicas en la microbiología del suelo, sin embargo, se requiere de mayor información en cuanto a la preparación en función de las proporciones e interacciones de los distintos materiales para elaborar conclusiones más acabadas al respecto.

## BIBLIOGRAFÍA

Al-Maliki, S., Al-Mammori, H. and Scullion, J. (2018). Interactions between Humic Substances and Organic Amendments Affecting Soil Biological Properties and Growth of *Zea mays* L. in the Arid Land Region. *Arid Land Research and Management*, 32(4), 455–470. doi: 10.1080/15324982.2018.1495670.

Alagöz, G., Özer, H. and A Peksen, A. (2020). Raised Bed Planting and Green Manuring Increased Tomato Yields through Improved Soil Microbial Activity in an Organic Production System. *Biological Agriculture & Horticulture*, 36(3), 187–199. doi: 10.1080/01448765.2020.1771416.

Amadou, A., Song, A., Tang, Z., Li, Y., Wang, E., Lu, Y., Liu, X., Yi, K., Zhang, B. and Fan, F. (2020). The Effects of Organic and Mineral Fertilization on Soil Enzyme Activities and Bacterial Community in the Below and Above Ground Parts of Wheat. *Agronomy*, 10(10), 18. doi: 10.3390/agronomy10101452.

Anjum, K.A. (2020). Decomposition of Soil Organic Matter Is Modulated by Soil Amendments. *Carbon Management*, 12(1), 1–14. doi: 10.1080/17583004.2020.1865038.

Ashraf, M., Hu, C., Wu, L., Duan, Y., Zhang, W., Aziz, T., Cai, A., Mohsin, M. and Xu, M. (2020). Soil and Microbial Biomass Stoichiometry Regulate Soil Organic Carbon and Nitrogen Mineralization in Rice-Wheat Rotation Subjected to Long-Term Fertilization. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3103–3113. doi: 10.1007/s11368-020-02642-y.

Aytenew, M. and Bore, G. (2020). Effects of Organic Amendments on Soil Fertility and Environmental Quality: A Review. *Journal of Plant Sciences*, 8(5), 112-119. doi: 10.11648/j.jps.20200805.12.

Berry, P.M., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Hatch, D.J., Cuttle, S.P., Rayns, F.W. and Gosling, P. (2002). Is the Productivity of Organic Farms Restricted by the Supply of Available Nitrogen? *Soil Use and Management*, 18(3), 248–255. doi: 10.1079/SUM2002129.

Blagodatskaya, E. and Kuzyakov, Y. (2008). Mechanisms of Real and Apparent Priming Effects and Their Dependence on Soil Microbial Biomass and Community Structure: Critical Review. *Biology and Fertility of Soils*, 45(2), 115–131. doi: 10.1007/s00374-008-0334-y.

Britt, J.H., Cushman, R.A., Dechow, C.D., Dobson, H., Humblot, P., Hutjens, M.F., Jones, G.A., Ruegg, P.S., Sheldon, I.M. and Stevenson, J.S. (2018). Invited Review: Learning from the future-A vision for dairy farms and cows in 2067. *Journal of Dairy*

*Science*, 101(5), 3722–3741. doi: 10.3168/jds.2017-14025.

Bronick, C.J. and Rattan, L. (2005). Soil Structure and Management: A Review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

Bulluck III, L. R., Brosius, M., Evanylo, G.K. and Ristaino, J.B. (2002). Organic and Synthetic Fertility Amendments Influence Soil Microbial, Physical and Chemical Properties on Organic and Conventional Farms. *Applied Soil Ecology* 19(2), 147–160. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00187-1.

De Carvalho Junior, J., Silva, M., Quintao de Almeida, A., Araújo, A. and Oliveira, L.C. (2019). Type and Quantity of Biochar Influenced Soil Microbial Activity and Carbon Priming Effect. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(4), 5–15. doi: 10.5433/1679-0359.2019v40n4p1405.

Cao, Y., Xu, L., Zhang, Z., Chen, Z. and He, N. (2019). Soil Microbial Metabolic Quotient in Inner Mongolian Grasslands: Patterns and Influence Factors. *Chinese Geographical Science*, 29 (6), 1001-1010. doi: 10.1007/s11769-019-1084-5.

Chathurika, J.A.S., Kumaragamage, D., Indraratne, S.P. and Dandeniya, W.S. (2019). Improving soil carbon pool, soil fertility and yield of maize (*Zea mays* L.) in low-fertile tropical Alfisols by combining fertilizers with slow-decomposing organic amendments. *The Journal of Agricultural Science*, 157, 45-54. doi: 10.1017/S0021859619000327.

Chen, G., Zhu, H. and Zhang, Y. (2003). Soil microbial activities and carbon and nitrogen fixation. *Research in Microbiology*, 154, 393–398. doi: 10.1016/S0923-2508(03)00082-2.

Chen, J. and Douglas F. (2020). Herbivores Stimulate Respiration from Labile and Recalcitrant Soil Carbon Pools in Grasslands of Yellowstone National Park. *Land Degradation and Development*, 31(17), 20–34. doi: 10.1002/ldr.3656.

Chen, J., Chen, D., Xu, Q., Fuhrmann, J.J., Li, L., Pan, G., Li, Y., Qin, H., Liang, C. and Sun, X. (2019). Organic Carbon Quality, Composition of Main Microbial Groups, Enzyme Activities, and Temperature Sensitivity of Soil Respiration of an Acid Paddy Soil Treated with Biochar. *Biology and Fertility of Soils*, 55, 85–97. doi: 10.1007/s00374-018-1333-2.

Chesworth, W., Arnold, R.W., Semoka, J., Finkl, C.W., Singer, A., Martínez, A., Soon, Y.K., Parkin, G., Spaargaren, O., Macías, F. (Eds.) (2008). *Encyclopedia of Soil Science*. Springer.

Cooperband, L. (2002). Building Soil Organic Matter with Organic Amendments : A Resource for Urban and Rural Gardeners, Small Farmers, Turfgrass Managers and Large-

Scale Producers. *Center for Integrated Agricultural System (CIAS), University of Wisconsin-Madison*, 13. Recuperado de: <https://cias.wisc.edu/>

Crowther, T., van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M.A., Keiser A.D., Mo, L., Averill, C. and Maynard, D.S. (2019). The Global Soil Community and Its Influence on Biogeochemistry. *Science*, 365(6455), 10. doi: 10.1126/science.aav0550.

Davidson, E. and Janssens, I. (2006). Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature*, 440(7081), 65–73. doi: 10.1038/nature04514.

Ding, F., Van Zwieten, L., Zhang, W., Weng, Z., Shi, S., Wang, J. and Meng, J. (2018). A Meta-Analysis and Critical Evaluation of Influencing Factors on Soil Carbon Priming Following Biochar Amendment. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 7–17. doi: 10.1007/s11368-017-1899-6.

Elbl, J., Makova, J., Javorekova, S., Medo, J., Kintl, A., Lošák, T. and Lukas, V. (2019). Response of Microbial Activities in Soil to Various Organic and Mineral Amendments as an Indicator of Soil Quality. *Agronomy*, 9(9), 19. doi: 10.3390/agronomy9090485.

Fang, Y., Pal Singh, B., Collins, D., Armostrong, R., Van Zwieten, L. and Tavakkoli, E. (2020). Nutrient Stoichiometry and Labile Carbon Content of Organic Amendments Control Microbial Biomass and Carbon-Use Efficiency in a Poorly Structured Sodic-Subsoil. *Biology and Fertility of Soils*, 56(2), 19–33. doi: 10.1007/s00374-019-01413-3.

Ferraz de Almeida, R., Rodrigues, J., Oliveira, F., Fonseca, L. and Wendling, B. (2019). Measuring the Labile and Recalcitrant Pools of Carbon and Nitrogen in Forested and Agricultural Soils: A Study under Tropical Conditions. *Forests*, 10(544), 11. doi: 10.3390/f10070544.

Fontaine, S., Bardoux, G., Abbadie, L. and Mariotti, A. (2004). Carbon Input to Soil May Decrease Soil Carbon Content. *Ecology Letters*, 7(4), 14–20. doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00579.x.

Forte, A., Fagnano, M. and Fierro, A. (2017). Potential Role of Compost and Green Manure Amendment to Mitigate Soil GHGs Emissions in Mediterranean Drip Irrigated Maize Production Systems. *Environmental Management*, 192, 68-78. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.01.037.

Frison, E. and Clément, C. (2020). The Potential of Diversified Agroecological Systems to Deliver Healthy Outcomes: Making the Link between Agriculture, Food Systems & Health. *Food Policy*, 96(101851), 8. doi: 10.1016/j.foodpol.2020.101851.

Fungo, B., Lehmann, J., Kalbitz, K., Tenywa, M., Thiongo, M. and Neufeldt, H. (2017).

Emissions intensity and carbon stocks of a tropical Ultisol after amendment with Tithonia green manure, urea and biochar. *Field Crops Research*, 209, 179-188. doi: 10.1016/j.fcr.2017.05.013.

Gaitán, D., Klerkx, L., Duncan, J., Trienekens, J., Huenchuleo, C., Dogliotti, S., Contesse, M. and Rosing, W. (2019). Characterizing Diversity of Food Systems in View of Sustainability Transitions. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 22. doi: 10.1007/s13593-018-0550-2.

Garcia, N., Hobley, E., Hübner, R. and Weismeyer, M. (Eds) (2018). *Climate-Smart Soil Management in Semiarid Regions*. Elsevier Inc.

Geyer, K.M., Dijkstra, P., Sinsabaugh, R. and Frey, S.D. (2019). Clarifying the interpretation of carbon use efficiency in soil through methods comparison. *Soil Biology and Biochemistry*, 128, 79-88. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.09.036.

Ghimire, B., Ghimire, R., VanLeeuwen, D. and Mesbah, A. (2017). Cover Crop Residue Amount and Quality Effects on Soil Organic Carbon Mineralization. *Sustainability (Switzerland)*, 9(12), 1–14. doi: 10.3390/su9122316.

Gori, A., Brito, B. and Ruiz, J. (2018). Climate Change and Agriculture: Do Environmental Preservation and Ecosystem Services Matter? *Ecological Economics*, 152, 27-39. doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.05.013.

Hardy, B., Sleutel, S., Dufey, J. and Cornelis, J. (2019). The Long-Term Effect of Biochar on Soil Microbial Abundance, Activity and Community Structure Is Overwritten by Land Management. *Frontiers in Environmental Science*, 7(110), 1–14. doi: 10.3389/fenvs.2019.00110.

Howden, S., Soussana, J., Tubiello, F., Chhetri, N., Dunlop, M. and Meinke, H. (2007). Adapting Agriculture to Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), 91–96. doi: 10.1073/pnas.0701890104.

IPCC, 2018: Anexo I: Glosario [Matthews, J.B.R. (Eds.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (Eds.)]. In Press

Jamaludin, N., Rashid, S.A. and Tan, T. (2019). Natural Biomass as Carbon Sources for

the Synthesis of Photoluminescent Carbon Dots. S.A. Rashid, R. Otham and M.Z. Hussein (Eds.) *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials* (pp 109-134). Elsevier.

Jiang, C. and Yu, W. (2019). The Relative Importance of Influence Factors to Field Soil Respiration Is Shifted by Straw Incorporations: Comprehensive Analysis of the Seasonal Variability. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 51–60. doi: 10.1007/s11368-018-2211-0.

Kaur, S., Dheri, G.S. and Benbi, D.K. (2019). Effect of Long-Term Fertilization in Maize-Wheat Cropping System on Carbon Mineralization in Soil. *Carbon Management*, 10(6), 523–32. doi: 10.1080/17583004.2019.1667700.

Kayikcioglu, H., Yener, H., Ongun, A. and Okur, B. (2019). Archives of Agronomy and Soil Science Evaluation of Soil and Plant Health Associated with Successive Three-Year Sewage Sludge Field Applications under Semi-Arid Biodegradation Condition. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(12), 59–76. doi: 10.1080/03650340.2019.1572882.

Khan, M., Lan, Z., Sial, T., Zhao, Y., Haseeb, A., Jianguo, Z., Zhang, A. and Lee, R. (2019). Straw and Biochar Effects on Soil Properties and Tomato Seedling Growth under Different Moisture Levels. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(12), 4–19. doi: 10.1080/03650340.2019.1575510.

Kweku, D.W., Bismark, O., Mawell, A., Desmond, K., Danso, K.B., Oti-Mensah, E., Quachie, A.T. and Adormaa, B.B. (2017). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research & Reports*, 17(6), 1-9. doi: 10.9734/JSRR/2017/39630.

Lal Meena, A., Jha, P., Dotaniya, M., Kumar, B., Meena, B.P. and Jat, R (2020). Carbon, Nitrogen and Phosphorus Mineralization as Influenced by Type of Organic Residues and Soil Contact Variation in Vertisol of Central India. *Agricultural Research*, 9(2), 232–40. doi: 10.1007/s40003-019-00425-7.

Lal, R. (2004). Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. *Environmental Management*, 33(4), 28–44. doi: 10.1007/s00267-003-9110-9.

Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 75–95. doi: 10.3390/su7055875.

Li, M., Wang, Y., Liu, M., Liu, Q., Xie, Z., Li, Z., Uchimiya, M. and Chen, Y. (2019). Three-Year Field Observation of Biochar-Mediated Changes in Soil Organic Carbon and Microbial Activity. *Journal of Environmental Quality*, 48(3), 717–26. doi: 10.2134/jeq2018.10.0354.

- Li, T., Gao, J., Bai, L., Wang, Y., Huang, J., Kumar, M. and Zeng, X. (2019). Influence of Green Manure and Rice Straw Management on Soil Organic Carbon, Enzyme Activities, and Rice Yield in Red Paddy Soil. *Soil & Tillage Research*, 195(104428), 7. doi: 10.1016/j.still.2019.104428.
- Li, Z., Wei, B., Wang, X., Zhang, Y. and Zhang, A. (2018). Response of Soil Organic Carbon Fractions and CO<sub>2</sub> Emissions to Exogenous Composted Manure and Calcium Carbonate. *Journal of Soils and Sediments*, 18(5), 1832–43. doi: 10.1007/s11368-018-1946-y.
- Liu, B., Bei, Q., Wang, X., Liu, Q., Hu, S., Lin, Z., Zhang, Y., Lin, X., Jin, H., Hu, T. and Xie, Z. (2020). Microbial Metabolic Efficiency and Community Stability in High and Low Fertility Soils Following Wheat Residue Addition. *Applied Soil Ecology*, 159(103848), 14. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103848.
- Liu, Z., Wu, Z., Liu, W., Bian, R., Ge, T., Zhang, W., Zheng, J., Drosos, M., Liu, X., Zhang, X., Cheng, K., Li, L. and Pan, G. (2020). Greater Microbial Carbon Use Efficiency and Carbon Sequestration in Soils: Amendment of Biochar versus Crop Straws. *GCB Bioenergy*, 12, 1092–1103. doi: 10.1111/gcbb.12763.
- Liu, Z., Zhu, M., Wang, J., Xiuxia Liu, X., Guo, W., Zheng, J., Bian, R., Wang, G., Zhang, X., Cheng, K., Liu, X., Li, L. and Pan, G. (2019). The Responses of Soil Organic Carbon Mineralization and Microbial Communities to Fresh and Aged Biochar Soil Amendments. *Global Change Biology*, 11, 20. doi: 10.1111/gcbb.12644.
- Lorenz, K. and Rattan L. (2018). *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Recuperado de: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-92318-5#:~:text=Carbon%20Sequestration%20in%20Agricultural%20Ecosystems%20addresses%20basic%20processes%20of%20soil,affecting%20their%20stock%20and%20fluxes>
- Luan, H., Gao, W., Huang, S., Tang, J., Li, M., Zhang, H., Chen, X. and Masiliūnas, D. (2020). Organic Amendment Increases Soil Respiration in a Greenhouse Vegetable Production System through Decreasing Soil Organic Carbon Recalcitrance and Increasing Carbon-Degrading Mic. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 77–92. doi: 10.1007/s11368-020-02625-z.
- Luan, H., Gao, W., Huang, S., Tang, J., Li, M., Zhang, H., Chen, X. and Masiliūnas, D. (2020). Substitution of Manure for Chemical Fertilizer Affects Soil Microbial Community Diversity, Structure and Function in Greenhouse Vegetable Production Systems. *PLOS ONE*, 15(2), 21. doi: 10.1371/journal.pone.0214041.
- Marzi, M., Shahbazi, K., Kharazi, N. and Rezai, M. (2020). The Influence of Organic Amendment Source on Carbon and Nitrogen Mineralization in Different Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(1), 177–91. doi: 10.1007/s42729-019-00116-w.

- Matus, F. (2021). Fine Silt and Clay Content Is the Main Factor Defining Maximal C and N Accumulations in Soils: A Meta-Analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 1–17. doi: 10.1038/s41598-021-84821-6.
- Mekki, A., Aloui, F. and Sayadi, S. (2019). Influence of Biowaste Compost Amendment on Soil Organic Carbon Storage under Arid Climate. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 69(7), 867–77. doi: 10.1080/10962247.2017.1374311.
- Mundim, K.C., Baraldi, S., Machado, H.G. and Vieira, F.M.C. (2020). Temperature coefficient (Q10) and its applications in biological systems: Beyond the Arrhenius theory. *Ecological Modelling*, 431, 109-127. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109127
- Muñoz, M, Erickson, T., Martini, D., Dixon, K. and Merrit, D. (2016). Soil Physicochemical and Microbiological Indicators of Short, Medium and Long Term Post-Fire Recovery in Semi-Arid Ecosystems. *Ecological Indicators*, 63, 14–22. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.11.038.
- Nisar, S. and Benbi, D. (2020). Stabilization of Organic C in an Indo-Gangetic Alluvial Soil under Long-Term Manure and Compost Management in a Rice-Wheat System. *Carbon Management*, 11-6, 533-547. doi: 10.1080/17583004.2020.1824483.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. and Hunt, H. (2000). Management Options for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Agricultural Soils. *Biogeochemistry*, 48(1), 147–63. doi: 10.1023/A:1006271331703.
- Pilli, K., Jason, M. and Sridhar, D. (2019). Research Trends in Agriculture Sciences. Dr. R.K. Naresh (Eds.) *Vermicomposting and its uses in Sustainable Agriculture*. (pp. 73-88). Akinik Publications.
- Powlson, D., Whitmore, A.P. and Goulding, K.W.T. (2011). Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change: A Critical Re-Examination to Identify the True and the False. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 42–55. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x.
- Qaswar, M., Huang J., Ahmed, W., Liu S., Li, D., Zhang, L., Liu, L., Xu, Y., Han, T., Du, J., Gao, J. and Zhang, H. (2019). Substitution of Inorganic Nitrogen Fertilizer with Green Manure (G.M.) Increased Yield Stability by Improving C Input and Nitrogen Recovery Efficiency in Rice Based Cropping System. *Agronomy*, 9(10), 18. doi: 10.3390/agronomy9100609.
- Qayyum, M., Liaquat, F., Rehman, R., Gul, M., Zafar ul Hye, M., Rizwan, M. and Ziar ur Rehman, M. (2017). Effects of Co-Composting of Farm Manure and Biochar on Plant Growth and Carbon Mineralization in an Alkaline Soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(33), 60–68. doi: 10.1007/s11356-017-0227-4.

- Raven, P. and Wagner, D. (2020). Agricultural Intensification and Climate Change Are Rapidly Decreasing Insect Biodiversity. *Special Feature: Perspective*, 118(2), 1–6. doi: 10.1073/pnas.2002548117.
- Reddy, N. and Crohn, D. (2019). Quantifying the Effects of Active and Cured Greenwaste and Dairy Manure Application and Temperature on Carbon Dioxide, Nitrous Oxide, and Dinitrogen Emissions from an Extreme Saline-Sodic Soil. *Catena*, 173, 83–92. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.036.
- Ren, F., Sun, N., Xu, M., Zhang, X., Wu, L. and Xu, M. (2019). Changes in Soil Microbial Biomass with Manure Application in Cropping Systems: A Meta-Analysis. *Soil and Tillage Research*, 194(104291), 11. doi: 10.1016/j.still.2019.06.008.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Mihir Shah., Steduto, P., De Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L. and Smith, J. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. *Ambio*, 46(1), 4–17. doi: 10.1007/s13280-016-0793-6.
- Rothé, M., Darnaudery, M. and Thuriès, L. (2019). Organic Fertilizers, Green Manures and Mixtures of the Two Revealed Their Potential as Substitutes for Inorganic Fertilizers Used in Pineapple Cropping. *Scientia Horticulturae*, 257(108691), 10. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108691.
- Sarma, B., Borkotoki, B., Narzari, R., Kataki, R. and Gogoi, N. (2017). Organic Amendments: Effect on Carbon Mineralization and Crop Productivity in Acidic Soil. *Journal of Cleaner Production*, 152, 157–66. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.124.
- Sarma, B., Farooq, M., Gogoi, N., Borkotoki, B., Kataki, R. and Garg, A. (2018). Soil Organic Carbon Dynamics in Wheat-Green Gram Crop Rotation Amended with Vermicompost and Biochar in Combination with Inorganic Fertilizers: A Comparative Study. *Journal of Cleaner Production*, 201, 471–480. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.004.
- Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A. and Rao, M.A. (2015). Organic Amendments as Sustainable Tool to Recovery Fertility in Intensive Agricultural Systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 333–52. doi: 10.4067/s0718-95162015005000031.
- Serna-Chavez, H., Fierer, N. and Van Bodegom, P. (2013). Global Drivers and Patterns of Microbial Abundance in Soil. *Global Ecology and Biogeography*, 22(10), 1162–72. doi: 10.1111/geb.12070.
- Shahzad, H., Iqbal, M., Latif, N., Khan, M.A. and Khan, Q.U. (2021). Managing Organic Carbon of Sandy Clay Loam Soil with Organic Amendments to Promote Particle

Aggregation. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(275), 9. doi: 10.1007/s12517-021-06590-w/Published.

Shehzadi, S., Shah, Z. and Mohammad, W. (2017). Impact of Organic Amendments on Soil Carbon Sequestration, Water Use Efficiency and Yield of Irrigated Wheat. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 21(1), 36–49. doi: 10.25518/1780-4507.13435.

Shen, Y., Zhu, L., Cheng, H., Yue, S. and Li, S. (2017). Effects of Biochar Application on CO<sub>2</sub> Emissions from a Cultivated Soil under Semiarid Climate Conditions in Northwest China. *Sustainability (Switzerland)*, 9(8), 13. doi: 10.3390/su9081482.

Sheng, Y. and Zhu, L. (2018). Biochar Alters Microbial Community and Carbon Sequestration Potential across Different Soil pH. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1391–1399. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.337.

Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K., Nabel, M., Rob-Nickoll, M. and Van Dongen, J. (2021). Comparing Straw, Compost, and Biochar Regarding Their Suitability as Agricultural Soil Amendments to Affect Soil Structure, Nutrient Leaching, Microbial Communities, and the Fate of Pesticides. *Science of the Total Environment*, 751(141607), 19. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141607.

Song, D., Tang, J., Xi, X., Zhang, S., Liang, G., Zhou, W. and Wang, X. (2018). Responses of Soil Nutrients and Microbial Activities to Additions of Maize Straw Biochar and Chemical Fertilization in a Calcareous Soil. *European Journal of Soil Biology*, 84, 1–10. doi: 10.1016/j.ejsobi.2017.11.003.

Tang, Y., Gao, W., Cai, K., Chen, Y., Li, C., Lee, X., Cheng, H., Zhang, Q. and Cheng, J. (2021). Effects of Biochar Amendment on Soil Carbon Dioxide Emission and Carbon Budget in the Karst Region of Southwest China. *Geoderma*, 385, 8. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114895.

Tompkins, E. and Adger, W. (2004). Does Adaptive Management of Natural Resources Enhance Resilience to Climate Change? *Ecology and Society*, 9(2), 10. doi: 10.5751/ES-00667-090210.

USDA. (2011). Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems, USDA NRCS East National Technology Support Center, Greensboro, NC. Recuperado de: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcseprd331820.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcseprd331820.pdf)

Walkiewicz, A., Kalinichenko, K., Kubaczyński, A., Brzezińska, M. and Bieganski, A. (2020). Usage of Biochar for Mitigation of CO<sub>2</sub> Emission and Enhancement of CH<sub>4</sub> Consumption in Forest and Orchard Haplic Luvisol (Siltic) Soils. *Applied Soil Ecology*, 156(103711), 9. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103711.

Wang, X., Bian, Q., Jiang, Y., Zhu, L., Chen, Y., Liang, Y., and Sun, B. (2021). Organic Amendments Drive Shifts in Microbial Community Structure and Keystone Taxa Which Increase C Mineralization across Aggregate Size Classes. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 11. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.108062.

Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, S. and Wang, Y. (2018). What Could Promote Farmers to Replace Chemical Fertilizers with Organic Fertilizers? *Journal of Cleaner Production*, 199, 882–90. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.222.

Wang, Y., Li, M., Jiang, C., Liu, M., Wu, M., Liu, P., Li, Z., Uchimiya, M. and Yuan, X. (2020). Soil Microbiome-Induced Changes in the Priming Effects of <sup>13</sup>C-Labelled Substrates from Rice Residues. *Science of the Total Environment*, 726(138562), 11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138562.

Willaarts, B., Oyonarte, C., Muñoz-Rojas, M., Ibáñez, J.J. and Aguilera, P.A. (2016). Environmental Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks in Two Contrasting Mediterranean Climatic Areas of Southern Spain. *Land Degradation and Development*, 27(3), 603–11. doi: 10.1002/ldr.2417.

Xu, W., Whitman, W., Gundale, M., Chien, C. and Chiu, C. (2021). Functional Response of the Soil Microbial Community to Biochar Applications. *GCB Bioenergy*, 13(1), 269–81. doi: 10.1111/gcbb.12773.

Yang, Y., Liu, H., Dai, Y., Tian, H., Zhou, W. and Lv, J. (2021). Soil Organic Carbon Transformation and Dynamics of Microorganisms under Different Organic Amendments. *Science of The Total Environment*, 750(1), 1-9, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141719.

Yupeng, U., Yufei, L., Yi, Z., Yanmeng, B and Zhenjun, S. (2018). Responses of Saline Soil Properties and Cotton Growth to Different Organic Amendments. *Pedosphere*, 28(3), 521–29. doi: 10.1016/S1002-0160(17)60464-8.

Zalidis, G., Stamatiadis, S., Takavakoglou, V., Escridge, K. and Misopolinos, N. (2002). Impacts of Agricultural Practices on Soil and Water Quality in the Mediterranean Region and Proposed Assessment Methodology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(2), 137–46. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00249-3.

Zhang, H. and Zhou, Z. (2018). Recalcitrant carbon controls the magnitude of soil organic matter mineralization in temperate forests of northern China. *Forest ecosystems*, 5(17), 10. doi: 10.1186/s40663-018-0137-z.

Zhao, L., Li, L., Cai, H., Fan, J., Wai Chau, H., Malone, R. and Zhang, C. (2019). Organic Amendments Improve Wheat Root Growth and Yield through Regulating Soil Properties. *Agronomy Journal*, 111(2), 482–95. doi: 10.2134/agronj2018.04.0247.

Zou, X.M., Ruan, H.H., Fu, Y., Yang, X.D. and Sha, L.Q. (2005). Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation–incubation procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1923–1928. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.02.028.

## APÉNDICE 1

**Cuadro 5.** Número de artículos utilizados en el desarrollo separados por tema y enmienda.

Nº Estudio	Título	Cita	Tema	Enmienda
1	Functional response of the soil microbial community to biochar applications	Xu, W. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Biochar
2	Carbon use efficiency and microbial functional diversity in a temperate Luvisol and a tropical Nitisol after millet litter and N addition	Schroeder, J. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
3	A study of olive mill wastewaters obtained from different treatment processes effects on chemical and microbial properties of a Typic Xerofluvent soil and wheat yield	Okur, N. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Residuos de cultivo
4	Soil respiration in relation to cropping sequence, nutrient management and environmental variables	Benbi, D. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar y estiércol
5	Effects of three biochars on copper immobilization and soil microbial communities in a metal-contaminated soil using a metallophyte and two agricultural plants	Meier, S. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar
6	Response of Microbial Activities in Soil to Various Organic and Mineral Amendments as an Indicator of Soil Quality	Elbl, J. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Compost, Vermicompost
7	The Long-Term Effect of Biochar on Soil Microbial Abundance, Activity and Community Structure Is Overwritten by Land Management	Hardy, B. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar
8	Type and quantity of biochar influenced soil microbial activity and carbon priming effect	Tínel de Carvalho, J. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar

9	Rhizosphere microbial biomass is affected by soil type, organic and water inputs in a bell pepper system	Qin, K. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Sustancias húmicas
10	Three-Year Field Observation of Biochar-Mediated Changes in Soil Organic Carbon and Microbial Activity	Li, M. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar
11	The relative importance of influence factors to field soil respiration is shifted by straw incorporations: comprehensive analysis of the seasonal variability	Jiang, C. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
12	Organic carbon quality, the composition of main microbial groups, enzyme activities, and temperature sensitivity of soil respiration of an acid paddy soil treated with biochar	Chen, J, <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Biochar
13	Microbial Community Shifts Reflect Losses of Native Soil Carbon with Pyrogenic and Fresh Organic Matter Additions and Are Greatest in Low-Carbon Soils	Whitman, T. <i>et al.</i> (2021)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
14	Greater microbial carbon use efficiency and carbon sequestration in soils: Amendment of biochar versus crop straws	Liu, Z. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Biochar y rastrojos de cultivo
15	Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A meta-analysis	Ren, F. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Estiércol
16	Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil	Song, D. <i>et al.</i> (2018)	Actividad microbiana	Biochar
17	The Effects of Organic and Mineral Fertilization on Soil Enzyme Activities and Bacterial Community in the Below- and Above-Ground Parts of Wheat	Amadou, A. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Estiércol y Biochar
18	Raised bed planting and green manuring increased tomato yields through improved soil microbial	Alagöz, G. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Abono verde

---

	activity in an organic production system			
19	Organic amendment increases soil respiration in a greenhouse vegetable production system through decreasing soil organic carbon recalcitrance and increasing carbon-degrading microbial activity	Luan, H. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Estiércol
20	Microbial metabolic efficiency and community stability in high and low fertility soils following wheat residue addition	Liu, B. <i>et al.</i> (2021)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
21	Nutrient stoichiometry and labile carbon content of organic amendments control microbial biomass and carbon-use efficiency in a poorly structured sodic-subsoil	Fang, Y. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
22	Influence of biowaste compost amendment on soil organic carbon storage under arid climate	Mekki, A. <i>et al.</i> (2018)	Actividad microbiana	Estiércol y compost
23	Soil organic carbon transformation and dynamics of microorganisms under different organic amendments	Yang, Y. <i>et al.</i> (2021)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo, estiércol y compost
24	Stabilization of organic C in an Indo-Gangetic alluvial soil under Long-term manure and compost management in a rice-wheat system	Nisar, S. and Benbi, D. (2020)	Actividad microbiana	Compost
25	Soil and microbial biomass stoichiometry regulate soil organic carbon and nitrogen mineralization in rice-wheat rotation subjected to long-term fertilization	Ashraf, M. <i>et al.</i> (2020)	Actividad microbiana	Estiércol
26	Soil organic carbon dynamics in wheat - Green gram crop rotation amended with vermicompost and biochar in combination with inorganic fertilizers: A comparative study	Sarma, B. <i>et al.</i> (2018)	Actividad microbiana	Compost y Biochar

---

27	Potential carbon sequestration and nitrogen cycling in long-term organic management systems	Bhowmik, A. <i>et al.</i> (2017)	Actividad microbiana	abono verde y estiércol
28	Long-term stabilization of crop residues and soil organic carbon affected by residue quality and initial soil pH	Wang, X. <i>et al.</i> (2017)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo
29	Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil	Li, T. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	Rastrojos de cultivo y abono verde
30	Managing agroecosystems for Soil Microbial Carbon Use Efficiency: Ecological Unknowns, Potential Outcomes, and a Path Forward	Kallenbach, C. <i>et al.</i> (2019)	Actividad microbiana	
31	Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH	Sheng, Y. and Zhu, L. (2018)	Actividad microbiana	Biochar
32	Decomposition of soil organic matter is modulated by soil amendments	Khan, A. (2020)	Actividad microbiana	Estiércol
33	Effects of substrate quality on carbon partitioning and microbial community composition in soil from an agricultural grassland	Abbruzzese, V. <i>et al.</i> (2021)	Actividad microbiana	Estiércol líquido
34	The Influence of Organic Amendment Source on Carbon and Nitrogen Mineralization in Different Soils	Marzi, M. <i>et al.</i> (2019)	Mineralización del Carbono	Estiércol, rastrojos del cultivo, vermicompost
35	The responses of soil organic carbon mineralization and microbial communities to fresh and aged biochar soil amendments	Liu, Z. <i>et al.</i> (2019)	Mineralización del Carbono	Biochar
36	Effect of long-term fertilization in maize-wheat cropping system on carbon mineralization in soil	Kaur, S. <i>et al.</i> (2019)	Mineralización del Carbono	Estiércol
37	Organic amendments drive shifts in microbial community structure and keystone taxa which increase C mineralization across aggregate size classes	Wang, X. <i>et al.</i> (2021)	Mineralización del Carbono	Rastrojos de cultivo y estiércol

38	Soil microbiome-induced changes in the priming effects of <sup>13</sup> C-labelled substrates from rice residues	Wang, Y. <i>et al.</i> (2020)	Mineralización del Carbono	Biochar y Rastrojos de cultivo
39	Carbon, Nitrogen and Phosphorus Mineralization as Influenced by Type of Organic Residues and Soil Contact Variation in Vertisol of Central India	Lal Meena, A. <i>et al.</i> (2019)	Mineralización del Carbono	Estiércol, rastrojos del cultivo, Biochar
40	Interactions between biochar and nitrogen impact soil carbon mineralization and the microbial community	Li, S. <i>et al.</i> (2020)	Mineralización del Carbono	Biochar
41	A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon priming following biochar amendment	Ding, F. <i>et al.</i> (2018)	Mineralización del Carbono	Biochar
42	Cover Crop Residue Amount and Quality Effects on Soil Organic Carbon Mineralization	Ghimire, B. <i>et al.</i> (2017)	Mineralización del Carbono	Rastrojos de cultivo
43	Effects of co-composting of farm manure and biochar on plant growth and carbon mineralization in an alkaline soil	Qayyum, M. <i>et al.</i> (2017)	Mineralización del Carbono	Compost
44	Organic amendments: Effect on carbon mineralization and crop productivity in acidic soil	Sarma, B. <i>et al.</i> (2017)	Mineralización del Carbono	Biochar, estiércol, vermicompost
45	Usage of biochar for mitigation of CO <sub>2</sub> emission and enhancement of CH <sub>4</sub> consumption in forest and orchard Haplic Luvisol (Siltic) soils	Walkiewicz, A. <i>et al.</i> (2020)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Biochar
46	Effects of biochar amendment on soil carbon dioxide emission and carbon budget in the karst region of southwest China	Tang, Y. <i>et al.</i> (2021)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Biochar
47	Quantifying the effects of active and cured green waste and dairy manure application and temperature on carbon dioxide, nitrous oxide, and dinitrogen emissions from an extreme saline-sodic soil	Reddy, N. and Crohn, D. (2019)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Estiércol, Biochar, Compost

48	Response of soil organic carbon fractions and CO <sub>2</sub> emissions to exogenous composted manure and calcium carbonate	Li, Z. <i>et al.</i> (2018)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Compost
49	Effects of Biochar Application on CO <sub>2</sub> Emissions from a Cultivated Soil under Semiarid Climate Conditions in Northwest China	Shen, Y. <i>et al.</i> (2017)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Biochar
50	Emissions intensity and carbon stocks of a tropical Ultisol after amendment with Tithonia green manure, urea and biochar	Fungo, B. <i>et al.</i> (2017)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Biochar y Abono verde
51	Potential role of compost and green manure amendment to mitigate soil GHGs emissions in Mediterranean drip-irrigated maize production systems	Forte, A. <i>et al.</i> (2017)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Compost y Abono verde
52	Manure pellet, woodchip and their biochars differently affect wheat yield and carbon dioxide emission from bulk and rhizosphere soils	Pokharel, P. and Chang, S. (2019)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Biochar y estiércol
53	Managing organic carbon of sandy clay loam soil with organic amendments to promote particle aggregation	Shahzad, H. <i>et al.</i> (2021)	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Rastrojos de cultivo, Biochar y estiércol