

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE AGROPECUARIA



**METODOLOGÍAS PARA MEDICIÓN DE RESPIRACIÓN DEL SUELO APLICADAS
EN DISTINTOS AGROECOSISTEMAS DE IMBABURA**

Trabajo de grado previa a la obtención del Título de Ingeniero Agropecuario

AUTOR:

Erick Fabricio Izama Gualzaqui

DIRECTOR:

Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSc.

Ibarra, Ecuador 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE AGROPECUARIA

METODOLOGÍAS PARA MEDICIÓN DE RESPIRACIÓN DEL SUELO APLICADAS EN DISTINTOS AGROECOSISTEMAS DE IMBABURA

Trabajo de grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación como
requisito parcial para obtener Título de:

INGENIERO AGROPECUARIO

APROBADO:

Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSc.

DIRECTOR


FIRMA

Ing. Luis Marcelo Albuja Illescas, MSc.

ASESOR


FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004999494
APELLIDOS Y NOMBRES:	Izama Gualzaqui Erick Fabricio
DIRECCIÓN:	Cotacachi-Imbabura. Quiroga
EMAIL:	efizamag@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	-----
TELÉFONO MÓVIL:	0939044208

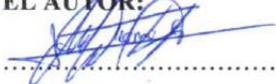
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Metodologías para medición de respiración del suelo aplicadas en distintos agroecosistemas de Imbabura
AUTOR (ES):	Izama Gualzaqui Erick Fabricio
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	02-02-2024
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Agropecuario
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:

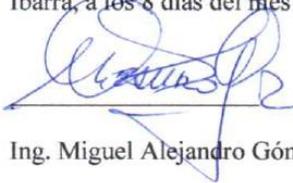

.....

Erick Fabricio Izama Gualzaqui

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Izama Gualzaquí Erick Fabricio, bajo mi supervisión.

Ibarra, a los 8 días del mes de julio de 2025.



Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSc.

DIRECTOR DE TESIS

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA-UTN

Fecha: Ibarra, a los 8 días del mes de julio del 2025

Izama Gualzaquí Erick Fabricio: Metodologías para medición de respiración del suelo aplicadas en distintos agroecosistemas de Imbabura

Trabajo de titulación. Ingeniera Agropecuario.

Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Agropecuaria. Ibarra, a los 8 días del mes de julio del 2025 páginas.

DIRECTOR: Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSC

El objetivo principal de la presente investigación fue: Evaluar metodologías de medición de la respiración del suelo en agroecosistemas en Imbabura.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

1. Calibrar el método de incubación utilizando hidróxido de potasio en comparación con el método Solvita para la medición precisa de la respiración del suelo.
2. Determinar la biomasa microbiana y proporciones entre hongos y bacterias mediante el método microBIOMETER en las áreas de estudio.
3. Analizar las relaciones entre variables físicas, químicas y biológicas del suelo con la tasa de respiración de los agroecosistemas.



.....

Ing. Miguel Alejandro Gómez Cabezas, MSc.

Director de Trabajo de Grado



.....

Erick Fabricio Izama Gualzaquí

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo manifestar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una manera u otra aportaron a que este trabajo se pudiera llevar a cabo y que este proyecto se concluyera exitosamente.

Agradezco de manera especial a mis profesores, al director de tesis, Ing. Miguel Gómez, MSc, por su orientación, paciencia y respaldo sin reservas. Su experiencia y saber fueron esenciales para el progreso de esta investigación, de igual manera a mi asesor, Ing. Marcelo Albuja, MSc, quien ha sido clave en mi etapa universitaria, y a la fundación EkoRural por el financiamiento de mi trabajo de investigación. Expreso mi agradecimiento a toda mi familia y amigos: Cesar M., Alex F., y Abel A, quienes me acompañaron en cada etapa de esta travesía.

A mis amigos, quienes han brindado un apoyo inestimable durante este proceso, gracias por brindarme constantemente una palabra de confort y una sonrisa en los instantes de agotamiento e incertidumbre dentro y fuera de la universidad. Su respaldo me ha motivado a seguir y lograr esta meta.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres, Luis Alberto Izama y María Rosa Gualzaqui, por ser mi motivación e inculcarme la importancia de la constancia y el empeño. Agradezco su amor sin condiciones, su respaldo incesante y por siempre confiar en mí, incluso en los instantes en que yo tenía dudas. Sin ellos, este éxito no habría sido posible. A mi hermana, Grace, que me ha brindado su afecto y estímulo durante este viaje y de manera especial a Joselyn P., quien supo apoyarme y acompañarme en todo momento.

Finalmente, dedico esta tesis a todos los que me han dedicado su tiempo, esfuerzo, que me han inspirado y ayudado a lo largo de mi vida académica. A todos ellos, gracias de todo corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5. Preguntas directrices	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Agroecosistemas	6
2.1.1 <i>Ecosistema natural</i>	7
2.1.2 <i>Agroecosistema degradado</i>	8
2.1.3 <i>Agroecosistema convencional</i>	8
2.1.4 <i>Agroecosistema agroecológico</i>	9
2.1.5 <i>Agroecosistema barbecho</i>	9
2.2. Descomposición de materia orgánica	10
2.3. Microorganismos responsables de la tasa de respiración del suelo	10
2.3.1 <i>Bacterias</i>	11
2.3.2 <i>Hongos</i>	11
2.3.3 <i>Actinomicetos</i>	12
2.3.4 <i>Hongos micorrícicos</i>	12
2.4. Ciclo del carbono	13
2.5. Factores que afectan a la tasa de respiración del suelo	13
2.5.1 <i>Temperatura</i>	14

2.5.2 Contenido de humedad	15
2.5.3 Tipo de suelo	15
2.5.4 Disponibilidad de nutrientes.....	16
2.5.5 pH del suelo	16
2.6. Medición de la respiración del suelo, masa microbiana y variables químicas/biológicas.....	16
2.6.1 Método de respiración (test Solvita).....	17
2.6.2 Método de respiración (hidróxido de potasio o KOH).....	18
2.6.3 Método microBIOMETER	19
2.6.4 Relación entre variables químicas y biológicas del suelo.....	19
2.7. Marco Legal.....	20
CAPÍTULO III.....	21
MARCO METODOLÓGICO.....	21
3.1. Caracterización del área de estudio.....	21
3.1.1 Ubicación del área de estudio	21
3.2. Materiales, equipos, insumos y herramientas	22
3.3. Métodos.....	23
3.3.1 Población y muestra	24
3.3.2 Unidad muestral.....	26
3.3.3 Análisis estadístico.....	27
3.4. Variables evaluadas	28
3.4.1 Correlación entre la emisión de CO ₂ medida por los métodos Solvita y KOH.....	28
3.4.2 Biomasa microbiana y proporción entre hongos y bacterias.....	37
3.4.3 Análisis de correlación entre variables químicas y biológicas	40
3.5. Manejo específico del estudio.....	41
3.5.1 Selección e identificación de los agroecosistemas	41
3.5.2 Recolección de muestras de suelo.....	41
3.5.3 Empacado de muestras de suelo	42
3.5.4 División de las muestras	43
3.5.5 Análisis en la universidad.....	43
3.5.6 Secado de muestras.....	44
CAPÍTULO IV.....	45

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. Calibración entre la emisión de CO ₂ medida por los métodos Solvita y KOH	45
4.1.1 Emisión de CO ₂ total (método test Solvita)	47
4.1.2 Emisión de CO ₂ total (método con hidróxido de potasio o KOH).....	50
4.2. MicroBIOMETER	54
4.2.1 Masa microbiana	54
4.2.2 Proporción hongos/ bacterias.....	57
4.3. Análisis de correlación entre variables químicas y biológicas	60
CAPÍTULO V	64
CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Recomendaciones	65
CAPÍTULO VI.....	66
REFERENCIAS.....	66
ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Interpretación de resultados mediante intervalos de coloración.	18
Figura 2 Mapa de ubicación de las distintas localidades y agroecosistemas.	21
Figura 3 Muestreo completamente al azar para las tres localidades.	27
Figura 4 Muestras expuestas a temperatura ambiente.	28
Figura 5 Tamizado de las muestras.	29
Figura 6 Pesaje de las muestras de suelo.	29
Figura 7 Rehidratación aplicada las muestras de suelo.	30
Figura 8 Aspirador empleado en la colecta de pequeños invertebrados.	30
Figura 9 Frascos sellados y reposando para obtener la captura de CO ₂	31
Figura 10 Cambio de color al pasar 24 horas de cada muestra de suelo.	31
Figura 11 Colorímetro para determinar la respiración del suelo.	32
Figura 12 Colocación de papel filtro y papel aluminio.	33
Figura 13 Pesaje de las muestras de suelo.	33
Figura 14 Rejilla para soportar los vasos precipitados de 10 ml.	34
Figura 15 Prototipo de frasco de incubación.	35
Figura 16 Calibración de pHmetro.	35
Figura 17 Adición del polvo de extracción.	37
Figura 18 Colecta de 1 ml de suelo.	38
Figura 19 Distribución homogénea del suelo con el polvo de extracción.	38
Figura 20 Reposo de la solución para su posterior colecta.	39
Figura 21 Tarjeta de prueba microBIOMETER antes de la aplicación del software.	39
Figura 22 Selección de parcelas representativas en las localidades de estudio.	41
Figura 23 Proceso de recolección de muestras de suelos en los agroecosistemas seleccionados.	42
Figura 24 Empacado de muestras de suelo en fundas selladas para su conservación y análisis.	42
Figura 25 División de las muestras de suelo para análisis en el INIAP y análisis experimental.	43
Figura 26 Preparación de las muestras: secado a temperatura ambiente.	44
Figura 27	45
Figura 28 Emisión de CO ₂ presente en diferentes localidades y agroecosistemas mediante el método Solvita.	47

Figura 29 Cantidad de emisión de CO ₂ presentes en diferentes localidades y agroecosistemas mediante el método hidróxido de potasio.	50
Figura 30 Masa microbiana presente en diferentes localidades y tipos de agroecosistemas.	54
Figura 31 Proporción entre hongos y bacterias presentes en diferentes localidades y tipos de manejo de suelo.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características geográficas de las zonas de estudio.....	22
Tabla 2 Materiales, equipos, insumos y herramientas utilizados en el trabajo de investigación para medir la emisión de CO ₂ mediante los métodos Solvita, hidróxido de potasio e identificar la masa microbiana	23
Tabla 3 Características generales de los agroecosistemas evaluados en las áreas de estudio	25
Tabla 4 Comparación de variables químicas y biológicas del suelo.....	40
Tabla 5 Análisis de correlación entre los métodos Solvita y KOH para la medición de CO ₂	46
Tabla 6 Correlaciones entre variables químicas, biológicas y de emisiones de CO ₂ en suelos agrícolas	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Participación en el IV Seminario Científico Internacional CONCIENCIA: "Cambio Climático, Sustentabilidad y Seguridad Alimentaria"	79
---	----

METODOLOGÍAS PARA MEDICIÓN DE RESPIRACIÓN DEL SUELO APLICADAS EN DISTINTOS AGROECOSISTEMAS DE IMBABURA

Autor: Izama Gualzaqui Erick Fabricio

Universidad Técnica del Norte

Correo: efizamag@utn.edu.ec

RESUMEN

La limitada disponibilidad de metodologías accesibles y confiables para medir la actividad microbiana del suelo limita la evaluación adecuadamente de la fertilidad y funcionalidad de los agroecosistemas en las comunidades San Francisco de Cajas, Punku Wayku y San Miguel de Moras Pungo. Ante esta problemática, el presente estudio evaluó metodologías de medición de la respiración del suelo en agroecosistemas de Imbabura. Se seleccionaron tres localidades con diferentes manejos del suelo y se planteó como objetivo calibrar y comparar dos metodologías de medición de la respiración del suelo como indicador de fertilidad: se observó una correlación estadísticamente significativa entre los métodos Solvita e hidróxido de potasio (KOH) para medir la respiración del suelo, con un coeficiente de Pearson de 0.62 y un valor $p = 0.0142$, lo que indica una buena coherencia entre ambos enfoques. Los resultados evidenciaron que los agroecosistemas natural y agroecológico presentaron las emisiones más altas de CO_2 ($67.8 \text{ mg CO}_2\text{-C}$), reflejando mayor actividad microbiana en comparación con los sistemas convencional, barbecho y degradado ($17.5 \text{ mg CO}_2\text{-C}$). La biomasa microbiana, evaluada con el método microBIOMETER, alcanzó los valores más altos (hasta $572 \mu\text{g C g}^{-1}$) en suelos naturales y agroecológicos, mientras que los suelos degradados mostraron los niveles más bajos ($334\text{-}417 \mu\text{g C g}^{-1}$). Finalmente, la proporción hongos/bacterias fue más equilibrada en suelos naturales y agroecológicos, y dominada por bacterias en suelos degradados, lo que indica menor estabilidad ecológica. Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar distintos métodos microbiológicos para evaluar de manera más precisa la salud edáfica.

Palabras clave: Actividad microbiana, fertilidad, practicas sostenibles, Solvita.

METHODOLOGIES FOR MEASURING SOIL RESPIRATION APPLIED IN DIFFERENT AGROECOSYSTEMS OF IMBABURA

Author: Izama Gualzaqui Erick Fabricio

Universidad Técnica del Norte

E-mail: efizamag@utn.edu.ec

ABSTRACT

The limited availability of accessible and reliable methodologies to measure soil microbial activity limits the adequate evaluation of the fertility and functionality of agroecosystems in the communities of San Francisco de Cajas, Punku Wayku and San Miguel de Moras Pungo. Given this problem, the present study evaluated methodologies for measuring soil respiration in agroecosystems of Imbabura. Three locations with different soil management were selected and the objective was to calibrate and compare two methodologies for measuring soil respiration as an indicator of fertility: a statistically significant correlation was observed between the Solvita and potassium hydroxide (KOH) methods for measuring soil respiration, with a Pearson coefficient of 0.62 and a p-value = 0.0142, indicating a good consistency between the two approaches. The results showed that natural and agroecological agroecosystems presented the highest CO₂ emissions (67.8 mg CO₂-C), reflecting higher microbial activity compared to conventional, fallow and degraded systems (17.5 mg CO₂-C). Microbial biomass, evaluated with the microBIOMETER method, reached the highest values (up to 572 µg C g⁻¹) in natural and agroecological soils, while degraded soils showed the lowest levels (334-417 µg C g⁻¹). Finally, the fungal/bacterial ratio was more balanced in natural and agroecological soils, and dominated by bacteria in degraded soils, indicating less ecological stability. These findings highlight the importance of integrating different microbiological methods to more accurately assess soil health.

Keywords: Microbial activity, fertility, sustainable practices, Solvita.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La respiración del suelo es un proceso esencial que refleja la actividad metabólica de los microorganismos edáficos y su interacción con la materia orgánica (Castro y Longoria, 2016). Este fenómeno permite que los organismos vivos presentes en el suelo consumen oxígeno (O_2) y liberan dióxido de carbono (CO_2) al ambiente (Durango et al., 2015). Esto es un indicador clave de la salud y funcionalidad del suelo, ya que está estrechamente relacionado con procesos como la descomposición de residuos orgánicos, la mineralización de nutrientes y el ciclo del carbono (Fernández y Jusmet, 2010); (Toledo et al., 2020). Según Orellana et al. (2012), el CO_2 liberado está estrechamente relacionado con el ciclo del carbono, ya que puede ser absorbido nuevamente por las plantas durante la fotosíntesis, completando así dicho ciclo. Además, la respiración del suelo facilita la mineralización de nutrientes orgánicos, transformándolos en formas más accesibles para las plantas.

Más allá de la liberación de CO_2 , la respiración del suelo enriquece el entorno, liberando nutrientes esenciales, que son fundamentales para el desarrollo saludable de las plantas (Toledo et al., 2020). De la misma manera los ciclos implican el intercambio de elementos químicos entre los organismos vivos y sus entornos, lo cual es fundamental para el equilibrio del ecosistema (León et al., 2018).

En el contexto local de Imbabura, la evaluación de la respiración del suelo aún no ha sido sistematizada ampliamente, a pesar de que existen diversos métodos accesibles y con potencial para ser aplicados en parcelas con diferentes sistemas de manejo. Entre los más utilizados destacan el método Solvita, el método de captura con hidróxido de potasio (KOH) y, más recientemente, el método microBIOMETER, una herramienta portátil basada en la estimación de masa microbiana presente en el suelo.

El método Solvita utiliza una reacción colorimétrica para cuantificar la producción de CO_2 , permitiendo evaluar la actividad microbiana en función del color que adquiere el gel tras su exposición al suelo (Hsieh et al., 2020). Es una prueba sencilla, útil para condiciones de campo, y

ha sido empleada para comparar la salud del suelo en distintos sistemas agrícolas (Haney et al., 2008). Por otro lado, el método KOH consiste en incubar muestras de suelo y capturar el CO₂ liberado mediante una solución de hidróxido de potasio, lo que permite una medición cuantitativa, aunque requiere mayor manipulación.

El microBIOMETER representa una innovación reciente en el monitoreo de suelos, ya que permite estimar de forma rápida la biomasa microbiana, medida como microgramos de carbono microbiano por gramo de suelo seco (Laine et al., 2025). A través de una aplicación móvil y un sistema de análisis visual, esta herramienta permite evaluar la salud del suelo sin necesidad de reactivos tóxicos, ni equipos costosos, siendo especialmente útil para agricultores.

Es importante señalar que la actividad biológica del suelo, expresada mediante la respiración y biomasa microbiana, se encuentra relacionada a variables químicas como la materia orgánica, el nitrógeno total, el fósforo disponible e incluso la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Doran y Zeiss, 2000). Estas variables no solo influyen en la composición y abundancia microbiana, sino que también son modificadas por la actividad de los microorganismos, es un proceso recíproco que determina la calidad y fertilidad del suelo (Six et al., 2006).

1.2. Problema

La respiración del suelo es un proceso biológico primordial que refleja la actividad microbiana y el flujo de carbono, siendo un indicador clave de la salud y funcionalidad de los ecosistemas agrícolas (Jia et al., 2025). Las áreas seleccionadas para este estudio, San Francisco de Cajas, Punku Wayku y San Miguel de Moras Pungo, en la provincia de Imbabura, presentan agroecosistemas de características diversas en cuanto a manejo, cobertura vegetal y el uso del suelo, que influyen directamente en la salud del suelo.

En la actualidad la medición de la respiración del suelo sigue siendo una práctica que no se emplea en el territorio local (Imbabura), a pesar de que existe una amplia variedad de metodologías como el método Solvita e hidróxido de potasio (KOH), cuyas ventajas y precisión no han sido suficientemente comparadas en las condiciones locales. En otras palabras, no se cuenta con estudios que analicen de manera rigurosa el comportamiento de estos métodos en los distintos agroecosistemas, dificultando así su validación y su interpretación de datos.

Por otro lado, también se desconoce el grado de aceptación por parte de los agricultores locales sobre la aplicación y la utilidad de estas metodologías, lo cual influye en su adopción y sostenibilidad a largo plazo. Asimismo, la falta de conocimientos técnicos y los saberes locales constituye una barrera para la implementación de prácticas de manejo del suelo (Castillo et al., 2020).

Ante esta problemática, se vuelve necesario desarrollar un estudio que combine el análisis técnico de distintas metodologías para medir la respiración del suelo con una comprensión contextual de su uso en comunidades locales de la Provincia de Imbabura, con el fin de identificar herramientas adecuadas, accesibles y culturalmente pertinentes que contribuyan a mejorar la salud del suelo y fortalecer la sostenibilidad agroecológica.

1.3. Justificación

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de promover prácticas agrícolas sostenibles en la provincia de Imbabura, una región caracterizada por una importante diversidad de agroecosistemas que enfrenta desafíos relacionados con la pérdida de calidad del suelo debido a prácticas intensivas y poco sostenibles. La intensificación agrícola y el uso excesivo de insumos químicos han alterado significativamente la actividad biológica del suelo, reduciendo su fertilidad y capacidad para prestar servicios ecosistémicos como la provisión de alimentos, el reciclaje de nutrientes y la regulación del ciclo del carbono (Gaglio et al., 2017).

En Ecuador los estudios sobre respiración del suelo aún son limitados, esta variable es clave para comprender el funcionamiento del ecosistema edáfico, ya que refleja la actividad microbiana como responsable de la descomposición de materia orgánica, liberación de nutrientes y emisión de CO₂ (Toledo et al., 2020). Por lo tanto, analizar este proceso en distintos agroecosistemas es fundamental para entender cómo influyen los usos del suelo y las prácticas de manejo en la dinámica microbiana.

En este contexto, el presente estudio compara tres metodologías de medición de la respiración del suelo por el método Solvita, hidróxido de potasio (KOH) y la técnica microBIOMETER, esta última orientada a evaluar la biomasa microbiana y la relación entre hongos: bacterias. Estas herramientas permiten estimar con precisión el nivel de actividad biológica del suelo, a partir de

la emisión de CO₂, la presencia de microorganismos activos y su relación con variables químicas como la materia orgánica y la conductividad eléctrica (Doran y Zeiss, 2000).

Los resultados esperados beneficiarán directamente a técnicos agropecuarios, productores locales de las comunidades rurales de Imbabura, quienes podrán acceder a metodologías prácticas, bajo costo y efectivas para evaluar la salud de sus suelos. Asimismo, se pretende aportar conocimiento científico que permitan establecer u orientar a la conservación del recurso suelo y a la transición hacia sistemas de producción más sostenibles en zonas andinas.

Por lo tanto, este estudio se realizó como parte del proyecto ‘Alimento para Todos’. Apoyando a los agricultores de los Andes a ser pioneros en una agricultura y alimentación más regenerativas para una mayor salud humana, equidad social y restauración de los ecosistemas financiado por el Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC) de Canadá. Esta es una iniciativa de investigación-acción liderada por la Fundación EkoRural en colaboración con el Colectivo Agroecológico del Ecuador, UTC, UTN, FLACSO y la Universidad de Montreal, la cual contribuirá a elaborar un protocolo para la evaluación de la respiración microbiana del suelo utilizando dos métodos que permitirán conocer la emisión de CO₂.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar metodologías de medición de la respiración del suelo en agroecosistemas en Imbabura.

1.4.2 Objetivos específicos

- Calibrar el método de incubación utilizando hidróxido de potasio en comparación con el método Solvita para la medición precisa de la respiración del suelo.
- Determinar la biomasa microbiana y proporciones entre hongos y bacterias mediante el método microBIOMETER en las áreas de estudio.
- Analizar las relaciones entre variables químicas y biológicas del suelo con la tasa de respiración de los agroecosistemas.

1.5. Preguntas directrices

- ¿La metodología de KOH de medición de la respiración del suelo ofrece una media similar a la provista por el método Solvita?
- ¿Se evidencia diversidad en la actividad microbiana en las parcelas analizadas?
- ¿Cuál es la influencia de las variables químicas y biológicas del suelo en la tasa de respiración del suelo?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este estudio se adentra en el universo de los agroecosistemas, explorando desde su estructura hasta los microorganismos que sustentan la respiración del suelo. Iniciamos diferenciando agroecosistemas naturales, degradados, barbechos, convencionales y agroecológicos, comprendiendo cómo cada uno impacta la salud del suelo.

La descomposición de la materia orgánica, esencial para la respiración del suelo, es detallada con énfasis en bacterias, hongos, actinomicetos y micorrizas. El ciclo del carbono contextualiza esta actividad, destacando su papel en la dinámica ambiental.

Exploramos factores como temperatura, humedad, tipo de suelo, disponibilidad de nutrientes y pH que influyen en la respiración. Concluimos con una revisión de las metodologías, incluyendo el kit Solvita y el método de hidróxido de potasio (KOH), herramientas clave para entender la actividad microbiana y las emisiones de CO₂.

Este marco teórico sirve como guía para comprender la interacción compleja entre la actividad agrícola y el suelo, proporcionando el contexto necesario para abordar los desafíos y oportunidades en el manejo sostenible de los agroecosistemas.

2.1. Agroecosistemas

Los agroecosistemas constituyen la esencia de la actividad agrícola, abarcando una zona específica donde los elementos bióticos (organismos vivos) y abióticos (factores no vivos) entran en una intrincada danza de interacciones ambientales (Anastasiou et al., 2014). Esta coreografía cuidadosamente diseñada y gestionada por humanos tiene como objetivo primordial la producción de alimentos y otros productos agrícolas, abarcando elementos esenciales como cultivos, ganado, suelo, agua y microorganismos.

La intervención humana ha dado forma a estos ecosistemas agrícolas, convirtiéndolos en entornos complejos y multifacéticos. La biodiversidad, la calidad del suelo y el manejo del agua son solo algunos de los factores clave que influyen en la salud y productividad del agroecosistema. Las relaciones simbióticas entre los diversos componentes bióticos y abióticos son fundamentales para comprender la dinámica de estos sistemas agrícolas.

En este contexto, el trabajo de Anastasiou et al. (2014) proporcionan una visión crítica de cómo los agroecosistemas sirven como un crisol donde convergen y se entrelazan elementos vitales para la producción sostenible de alimentos. La comprensión de estos complejos engranajes se vuelve esencial al explorar la relación entre la respiración del suelo y la salud general de los agroecosistemas (Anastasiou et al., 2014).

Cerrato y Alarcón (2001) examinan la relevancia de la microbiología del suelo en la agricultura sustentable, destacando que la implementación de prácticas agrícolas sustentables, tales como la rotación de cultivos y la utilización moderada de abonos, promueve un balance en los agroecosistemas, estimulando la diversidad microbiana. Esta variedad de microorganismos es esencial para resistir plagas y enfermedades, lo cual disminuye la necesidad de agroquímicos. De acuerdo con los escritores, entender y gestionar correctamente los microorganismos del suelo son fundamentales para fomentar una agricultura sustentable y salvaguardar el entorno natural (Cerrato y Alarcón, 2001).

2.1.1 Ecosistema natural

Los ecosistemas naturales, según la perspectiva de Sarandón (2002), representan un ballet biológico donde las interacciones dinámicas entre organismos vivos (bióticos) y factores no vivos (abióticos) se desenvuelven sin la intervención directa del ser humano. Estos sistemas biológicos han evolucionado a lo largo del tiempo de manera orgánica y libre, sin la influencia deliberada de actividades humanas.

La obra de Sarandón (2002) arroja luz sobre la pureza intrínseca de estos ecosistemas, donde la ausencia de manipulación humana permite que los procesos naturales de desarrollo sigan su curso sin restricciones externas. La biodiversidad, la dinámica de los ciclos biogeoquímicos y la adaptación evolutiva son características distintivas de estos ecosistemas inalterados de (Sarandón 2002).

Este concepto de ecosistema natural se erige como un punto de referencia fundamental al considerar cómo las actividades antropogénicas en los agroecosistemas pueden influir en la respiración del suelo y, por ende, en la salud general del sistema. Explorar la contraposición entre ecosistemas naturales y sistemas modificados por el hombre proporciona un marco conceptual valioso para abordar las complejidades de la agricultura sostenible y la gestión adecuada del suelo.

2.1.2 Agroecosistema degradado

Los agroecosistemas degradados representan áreas agrícolas que han experimentado daños significativos en la salud del suelo, la biodiversidad y las funciones ecológicas debido a prácticas agrícolas indiscriminadas e insostenibles que conducen a la degradación del suelo y la contaminación (Nyström et al., 2012). Estos daños no solo afectan la productividad de los cultivos, sino que también comprometen la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a la destrucción de los microorganismos presentes en el suelo (Nyström et al., 2012).

La pérdida de biodiversidad y las funciones ecológicas esenciales contribuyen a la disminución de la capacidad del suelo para mantener cultivos saludables a lo largo del tiempo. En este contexto, abordar la degradación de los agroecosistemas se convierte en una necesidad urgente. Es imperativo adoptar prácticas agrícolas que respeten el medio ambiente y sean sostenibles, reconociendo la interdependencia entre las acciones humanas y la salud del suelo. La restauración y regeneración de estos agroecosistemas emergen como estrategias clave para garantizar su viabilidad a largo plazo.

2.1.3 Agroecosistema convencional

El agroecosistema convencional, como señala Prato (2005), se define por su énfasis en un sistema de producción arraigado en métodos y prácticas tradicionales. En este contexto, la característica distintiva radica en la intensiva utilización de insumos, tales como fertilizantes químicos, pesticidas, monocultivos y la aplicación de maquinaria agrícola, buscando como principal objetivo el aumento de la producción (Boiteau et al., 2014). Aunque estas prácticas pueden mostrar mejoras inmediatas en la productividad, su impacto a largo plazo genera una preocupante inestabilidad en el medio ambiente.

El agroecosistema convencional, al depender fuertemente de métodos convencionales de cultivo, tiende a desequilibrar el entorno natural alrededor. El uso intensivo de productos químicos, como los fertilizantes y pesticidas, puede provocar la acumulación de residuos y la contaminación del suelo y del agua, afectando la salud a largo plazo del ecosistema circundante (Boiteau et al., 2014). Además, la práctica de monocultivos, al centrarse en un solo tipo de cultivo, disminuye la diversidad biológica del agroecosistema, volviéndolo más susceptible a plagas y enfermedades.

A pesar de su capacidad para aumentar la producción de manera eficiente, este modelo agrícola convencional se enfrenta a desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad ambiental. La dependencia constante de insumos químicos puede llevar a la degradación del suelo, erosionando su estructura y disminuyendo su fertilidad a largo plazo. Asimismo, la maquinaria agrícola, aunque mejora la eficiencia en el corto plazo, contribuye a la compactación del suelo y puede afectar negativamente a la biodiversidad del entorno.

2.1.4 Agroecosistema agroecológico

El agroecosistema agroecológico, arraigado en sólidos principios y prácticas, fusiona conceptos de ecología y agronomía para forjar un desarrollo agrícola resistente y sostenible (Negash et al., 2020). Este enfoque busca no solo maximizar la producción agrícola, sino también optimizar la salud del suelo y fomentar la resiliencia del ecosistema. En consonancia, Palomo et al. (2018) resaltan la misión de la agroecología en la promoción activa de la biodiversidad y la mejora continua de la calidad del suelo. Asimismo, subrayan su impacto al capacitar a los agricultores para reducir la dependencia de recursos externos, abriendo paso a prácticas agrícolas más sostenibles y amigables con el medio ambiente (Palomo et al., 2018).

La transición hacia agroecosistemas agroecológicos no solo representa un cambio en los métodos de producción, sino una transformación hacia sistemas agrícolas que buscan la armonía con la naturaleza. Al priorizar la diversidad biológica y la gestión eficiente de los recursos, estos sistemas buscan mitigar los impactos negativos de la agricultura convencional, proveyendo así un enfoque más equilibrado y resiliente para la producción de alimentos.

2.1.5 Agroecosistema barbecho

El barbecho, arraigado en la práctica agrícola ancestral, se define como el período en el cual se deja un campo sin cultivar durante uno o varios ciclos de cultivo (Sircely y Naeem, 2013). Este enfoque, en apariencia pasivo, implica que el suelo permanezca en un estado de descanso, libre de intervenciones humanas directas durante este intervalo temporal.

Durante el barbecho, se busca que el suelo recupere sus propiedades naturales y se regenere de manera espontánea. La ausencia de labores agrícolas permite que los procesos biológicos y químicos se desarrollen sin interferencias, favoreciendo la restauración de la salud del suelo. Además, este período de descanso contribuye a reducir la presión sobre los recursos del suelo y a

preservar la biodiversidad del ecosistema circundante. En esencia, el barbecho no solo es un espacio temporal de reposo para el suelo, sino una estrategia que abraza la sabiduría de la naturaleza para promover la sostenibilidad en los agroecosistemas.

2.2. Descomposición de materia orgánica

La materia orgánica, constituida por residuos de cultivos y otros compuestos orgánicos, desempeña un papel crucial en los suelos al proporcionar una valiosa fuente de carbono para los microorganismos presentes en este ecosistema (Julca et al., 2006). Este proceso de descomposición implica la transformación de compuestos orgánicos complejos presentes en la materia orgánica en formas más simples.

Durante la descomposición, se liberan compuestos más simples, generando una fuente de energía que alimenta los procesos metabólicos de los microorganismos en el suelo. Esta compleja red de interacciones biológicas y químicas contribuye a la dinámica del suelo, afectando directamente la disponibilidad de nutrientes para las plantas y otros organismos presentes en el ecosistema. La comprensión de estos procesos de descomposición de materia orgánica es esencial para evaluar la salud del suelo y diseñar prácticas agrícolas que promuevan la sostenibilidad y la biodiversidad en los agroecosistemas.

2.3. Microorganismos responsables de la tasa de respiración del suelo

La respiración del suelo, un proceso esencial en el ciclo biogeoquímico es ejecutada principalmente por una diversidad de microorganismos, entre los cuales se destacan bacterias, hongos y otros organismos presentes en el suelo (Paolini y Gomez, 2018). Estos microorganismos desempeñan un papel crucial al descomponer la materia orgánica del suelo como parte de su proceso metabólico.

Las bacterias, como microorganismos unicelulares, exhiben diversas adaptaciones, siendo algunas aeróbicas, requiriendo oxígeno para sus procesos metabólicos, mientras que otras son anaeróbicas, capaces de operar en ausencia de oxígeno (Ivashchenko et al., 2020). Por otro lado, los hongos, incluyendo especies como *Aspergillus* y *Penicillium*, descomponen compuestos orgánicos más complejos, como celulosa y lignina, contribuyendo significativamente al ciclo de la materia orgánica en el suelo (Moreno, 2016).

Además, los actinomicetos, un grupo bacteriano con características intermedias entre bacterias y hongos, desempeñan un papel fundamental en la descomposición de la materia orgánica, liberando nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y azufre durante este proceso (Franco, 2009). Así mismo, los hongos micorrícicos establecen simbiosis con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles (Restrepo et al., 2019). La comprensión detallada de estos microorganismos y sus interacciones es esencial para evaluar la salud del suelo y diseñar estrategias de manejo que promuevan la actividad microbiana y la sostenibilidad del ecosistema.

2.3.1 Bacterias

Según Ivashchenko et al. (2020), las bacterias desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica del suelo. Estos microorganismos unicelulares exhiben una notable diversidad en sus adaptaciones metabólicas. Algunas bacterias son aeróbicas, lo que significa que requieren oxígeno para llevar a cabo sus procesos de descomposición. Por otro lado, existen bacterias anaeróbicas que pueden realizar sus funciones sin la presencia de oxígeno.

Este variado comportamiento adaptativo de las bacterias es fundamental para entender la dinámica de la respiración del suelo. Las bacterias aeróbicas prosperan en ambientes bien oxigenados, descomponiendo materia orgánica y liberando dióxido de carbono como subproducto metabólico. En contraste, las bacterias anaeróbicas operan en entornos donde el oxígeno es limitado o incluso ausente, participando en la descomposición de materia orgánica sin depender del oxígeno.

La comprensión de esta diversidad bacteriana y sus preferencias ambientales es esencial para evaluar cómo los diferentes tipos de bacterias contribuyen a la respiración del suelo en diversos contextos y condiciones ambientales.

2.3.2 Hongos

La participación de los hongos en la respiración del suelo es de vital importancia para la descomposición de sustancias orgánicas más complejas. Específicamente, especies de hongos descomponedores, como *Aspergillus* y *Penicillium*, desempeñan un papel destacado en este proceso (Moreno, 2016).

Estos hongos poseen la capacidad única de descomponer compuestos orgánicos más resistentes, como la celulosa y la lignina. La celulosa forma parte de las paredes celulares de las plantas y es

una sustancia orgánica compleja, mientras que la lignina es un polímero presente en tejidos vegetales que brinda resistencia y rigidez. La habilidad de los hongos para descomponer estas sustancias orgánicas más recalcitrantes contribuye significativamente a la liberación de nutrientes esenciales y a la dinámica global de la respiración del suelo.

El entendimiento de la función específica de estos hongos descomponedores en la descomposición de materia orgánica compleja amplía nuestra visión sobre la diversidad de actores involucrados en los procesos biogeoquímicos del suelo.

2.3.3 *Actinomicetos*

Los actinomicetos, un grupo singular de bacterias que exhiben propiedades intermedias entre bacterias y hongos, juegan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica en el suelo (Franco, 2009). Su participación en los procesos biogeoquímicos del suelo se traduce en la desintegración de compuestos orgánicos complejos hacia formas más básicas, liberando nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, azufre y otros elementos vitales para el desarrollo de las plantas.

Durante el proceso de descomposición, los actinomicetos emplean oxígeno en su metabolismo para llevar a cabo la ruptura de enlaces en compuestos orgánicos complejos. Esta actividad metabólica no solo libera nutrientes esenciales, sino que también emite dióxido de carbono como subproducto. Esta liberación de CO₂ contribuye al ciclo del carbono, un fenómeno interconectado con la respiración del suelo, destacando la importancia de los actinomicetos en la dinámica y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

2.3.4 *Hongos micorrícicos*

Las micorrizas, en su función simbiótica con las raíces de las plantas, emergen como actores clave para promover la sostenibilidad en la agricultura (Restrepo et al., 2019). Estas asociaciones beneficiosas facilitan la absorción de nutrientes esenciales por parte de las plantas, estableciendo un equilibrio ecológico fundamental para el desarrollo saludable de los cultivos.

Al formar uniones simbióticas, las micorrizas actúan como extensiones del sistema de raíces de las plantas, expandiendo su capacidad para adquirir nutrientes, especialmente aquellos que pueden ser escasos en el suelo. Este proceso no solo mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes,

sino que también ayuda a la resistencia de las plantas ante condiciones adversas, fortaleciendo así la resiliencia del agroecosistema.

2.4. Ciclo del carbono

El ciclo del carbono, coreografiado por la interacción armoniosa entre la atmósfera, las plantas y los microorganismos, inicia su majestuoso espectáculo con la captura del dióxido de carbono atmosférico. Según Orellana et al. (2012) este proceso se lleva a cabo mediante la fotosíntesis realizada por las plantas, que, en colaboración con los microorganismos del suelo, marca el comienzo de una sinfonía natural. En este ballet ecológico, la respiración del suelo emerge como una nota esencial. La exhalación de dióxido de carbono (CO₂) desde el suelo constituye un acto crucial en el ciclo del carbono, donde el CO₂ liberado encuentra su pareja perfecta en las hojas de las plantas. Fu et al. (2016) señalan que este dióxido de carbono liberado durante la respiración del suelo se convierte nuevamente en una herramienta valiosa para las plantas, que lo absorben mediante la fotosíntesis, completando así el ciclo del carbono en un elegante movimiento circular.

La biomasa microbiana y la materia orgánica, guardianes temporales del carbono, también participan en este baile. Al liberar CO₂ durante su proceso metabólico, contribuyen al flujo constante de carbono entre los compartimentos terrestres y atmosféricos. Esta danza cíclica no solo es un testimonio de la interconexión magistral de la vida en la tierra, sino también un recordatorio de la importancia de mantener la armonía en este ciclo vital para garantizar la salud de nuestro planeta.

2.5. Factores que afectan a la tasa de respiración del suelo

La respiración del suelo, una composición maestra de actividad biológica y química se despliega en una partitura compleja donde los protagonistas son los microorganismos. Estos minúsculos actores desempeñan un papel fundamental al liberar dióxido de carbono (CO₂) en el escenario del suelo.

En esta sinfonía del suelo, la actividad biológica y química, orquestada por los microorganismos, se ve influenciada por diversos factores. La temperatura, como una batuta maestra, dirige el ritmo de la actividad microbiana. Huang et al. (2017) revelan que, en climas cálidos, la respiración del suelo se acelera, creando un compás más rápido en esta melodía subterránea.

La humedad del suelo, un componente clave en esta partitura, regula la intensidad de la actividad microbiana. Yan et al. (2016) indican que la cantidad adecuada de humedad crea el ambiente propicio para que los microorganismos realicen sus procesos metabólicos, mientras que extremos de sequía o exceso de humedad pueden silenciar esta sinfonía del suelo. Además, la composición del suelo, con sus diferentes texturas de arena, limo y arcilla, desempeña un papel crucial. Hancock et al. (2008) sugiere que la aireación del suelo, determinada por su textura, afecta la disponibilidad de oxígeno y nutrientes esenciales para los microorganismos, influyendo así en la tasa de respiración del suelo.

La disponibilidad de nutrientes, otro elemento en la partitura es esencial para la actividad microbiana. Marschner y Rengel (2012) explican que los microorganismos descomponedores dependen de nutrientes como el carbono orgánico y el nitrógeno para llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica.

El pH del suelo, un matiz importante en esta obra puede afectar la actividad microbiana, como sugieren Yang et al. (2019), ya que los microorganismos son sensibles a cambios en la acidez o alcalinidad del suelo. En conjunto, estos factores componen una sinfonía única en la respiración del suelo, donde los microorganismos son los virtuosos encargados de mantener el ritmo de esta melodía subterránea (Yang et al., 2019).

2.5.1 Temperatura

La temperatura del suelo se erige como una batuta maestra en la ejecución de la respiración del suelo, donde la actividad microbiana y las reacciones químicas son los músicos obedientes. Este componente crítico no solo refleja la temperatura ambiente, sino que también influye directamente en la velocidad y el ritmo de este proceso subterráneo (Huang et al., 2017).

En regiones de climas cálidos, el suelo se convierte en un escenario propicio para una sinfonía acelerada. La elevación de la temperatura actúa como un catalizador, incitando a los microorganismos a intensificar su labor de descomposición de la materia orgánica. Como resultado, la respiración del suelo se acelera, liberando dióxido de carbono (CO₂) en una cadencia más rápida. Esta danza térmica entre la temperatura del suelo y la actividad microbiana revela la intrincada relación que regula la vitalidad subterránea y marca el compás de la respiración terrestre.

2.5.2 Contenido de humedad

La humedad del suelo juega un papel determinante en la dinámica de la respiración del suelo, actuando como un factor crucial que regula la actividad microbiana y, por ende, la liberación de dióxido de carbono (CO₂) en el ambiente (Yan et al., 2016). Según las investigaciones de Huang et al. (2017), la temperatura del suelo se ve afectada por la humedad, lo que, a su vez, influye en la actividad microbiana y en las reacciones químicas asociadas. En climas cálidos, la respiración del suelo tiende a acelerarse debido a la mayor actividad microbiana favorecida por el aumento de temperatura.

Es importante destacar que la humedad óptima del suelo es esencial para proporcionar un entorno propicio para los microorganismos y facilitar sus procesos metabólicos (Yan et al., 2016). Un suelo con exceso de humedad puede llevar a la anoxia, reduciendo la disponibilidad de oxígeno y, por ende, limitando la respiración del suelo. Por otro lado, la escasez de humedad puede provocar la inactividad microbiana y, consecuentemente, una disminución en la tasa de respiración del suelo. Este delicado equilibrio hídrico emerge como un elemento clave en la comprensión de la ecología del suelo y sus procesos respiratorios.

2.5.3 Tipo de suelo

La composición del suelo, caracterizada por distintas texturas como arena, limo y arcilla, desempeña un papel fundamental en la regulación de la respiración del suelo (Hancock et al., 2008). Según las observaciones de estos investigadores, el tipo de suelo incide directamente en la disponibilidad de oxígeno y nutrientes esenciales para los microorganismos presentes en el suelo. Específicamente, aquellos suelos con una mayor capacidad de aireación tienden a exhibir tasas de respiración significativamente más elevadas.

La textura del suelo influye en su capacidad para retener agua, afectando así la disponibilidad de oxígeno para los microorganismos (Hancock et al., 2008). Suelos bien aireados, comúnmente asociados con texturas más arenosas, brindan condiciones propicias para una actividad microbiana más intensa y, por ende, una mayor tasa de respiración. Esta relación entre la estructura del suelo y la respiración microbiana subraya la importancia de comprender la variabilidad en las propiedades del suelo para evaluar de manera precisa los procesos respiratorios en los ecosistemas terrestres.

2.5.4 Disponibilidad de nutrientes

El correcto funcionamiento de la actividad microbiana y, por ende, la tasa de respiración del suelo se encuentra intrínsecamente vinculado a la disponibilidad de nutrientes esenciales, como el carbono orgánico y el nitrógeno (Marschner y Rengel, 2012). La presencia adecuada de estos nutrientes es un requisito fundamental para que los microorganismos descomponedores lleven a cabo eficientemente la descomposición de la materia orgánica.

Marschner y Rengel (2012) destacan que la cantidad y calidad de los nutrientes disponibles son determinantes críticos en la dinámica de la respiración del suelo. Un suministro óptimo de carbono orgánico y nitrógeno no solo favorece la actividad metabólica de los microorganismos, sino que también tiene un impacto directo en la velocidad y eficacia del proceso de descomposición. La comprensión de la relación entre la disponibilidad de nutrientes y la respiración del suelo es esencial para desarrollar estrategias de manejo sostenibles que promuevan la salud de los agroecosistemas y la conservación de la biodiversidad del suelo.

2.5.5 pH del suelo

El pH del suelo, un indicador crucial de su acidez o alcalinidad emerge como un factor determinante en la modulación de la actividad microbiana y, por ende, en la tasa de respiración del suelo. La acidez o alcalinidad del suelo puede afectar las funciones metabólicas de los microorganismos presentes, lo que, a su vez, influye directamente en la velocidad y eficiencia de la descomposición de la materia orgánica (Yang et al., 2019).

Yang et al. (2019) resaltan que los microorganismos del suelo exhiben una notable sensibilidad a los cambios en el pH, lo que impacta sus procesos metabólicos fundamentales. Dado que la respiración del suelo es una respuesta directa de la actividad microbiana, comprender la relación entre el pH del suelo y la función metabólica de los microorganismos se vuelve esencial para anticipar y gestionar los efectos de las variaciones en el pH en la salud y sostenibilidad de los agroecosistemas.

2.6. Medición de la respiración del suelo, masa microbiana y variables químicas/biológicas

La medición de la respiración del suelo constituye un proceso crucial que se orienta a cuantificar la cantidad total de dióxido de carbono (CO₂) liberado por el suelo. Este fenómeno,

intrínsecamente vinculado a la actividad microbiana y otros procesos biológicos en el suelo, se revela como un indicador clave de la vitalidad y funcionamiento del ecosistema edáfico.

Diversos métodos han sido desarrollados con el propósito de evaluar la respiración del suelo, destacando dos enfoques prominentes. El primero, como ilustra el kit de prueba Solvita, se centra en medir la actividad microbiana y la cantidad total de CO₂ emitido por el suelo (Hill et al., 2013). Este método proporciona una evaluación rápida y accesible, permitiendo identificar la tasa de respiración del suelo en intervalos de tiempo específicos. Otro enfoque, basado en el uso de hidróxido de potasio (KOH), implica capturar el CO₂ liberado durante un período de incubación y cuantificarlo para derivar la tasa de respiración del suelo (Lavelle et al., 2016). Ambos métodos ofrecen herramientas valiosas para profundizar en la comprensión de la dinámica de los agroecosistemas y su respuesta a factores ambientales diversos.

2.6.1 Método de respiración (test Solvita)

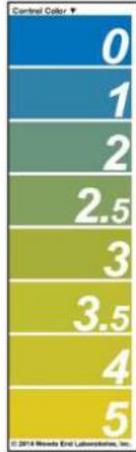
El método de respiración utilizando el kit de prueba Solvita se ha establecido como una herramienta esencial para cuantificar la actividad microbiana y la emisión total de dióxido de carbono (CO₂) por parte de un suelo específico. Desarrollado por Hill et al. (2013), este método se distingue por su capacidad para ofrecer una evaluación rápida y directa de la tasa de respiración del suelo.

La aplicación de la prueba Solvita se traduce visualmente a través de la observación de la coloración generada en el suelo durante la prueba. Como señalan Lavelle et al. (2016), la variación en la intensidad y tonalidad del color está directamente relacionada con la cantidad de CO₂ emitido por el suelo analizado. La Figura 1 proporciona una representación gráfica de este proceso, destacando la asociación entre la coloración específica y la tasa de respiración del suelo. Este método no solo simplifica la medición de la actividad microbiana, sino que también facilita la interpretación de los resultados al proporcionar una indicación visual clara y comprensible (Lavelle et al., 2016).

Al cabo de 24 horas se realiza la lectura de la sonda mediante la coloración, posteriormente se verifica el número de color Solvita e identificar el flujo de CO₂ en g/m²/día.

Figura 1

Interpretación de resultados mediante intervalos de coloración.



COLOR	CO2-C Range	2019	2016
0	0 - 3		
1	4 - 9	LOW	LOW
2	10 - 14		
2.5	15 - 22		
3	23 - 34	MED LOW	
3.5	35 - 55		MED
4	56 - 85	MED HIGH	
4.5	86 - 125		
5	126 - 195	HIGH	HIGH
5.5	> 196 -	Excessive	

Nota: La Figura 1 muestra la interpretación de los resultados de la respiración del suelo mediante intervalos de coloración, donde cada color representa un rango específico de CO₂-C en el suelo (mg de CO₂ por kg de suelo). Los valores van desde 0, que indica una baja emisión de CO₂, hasta 5.5, que representa un nivel excesivo de respiración. Los colores varían desde azul (valores bajos de CO₂-C) hasta rojo (niveles excesivos), lo que facilita la evaluación visual de la actividad microbiana en el suelo.

2.6.2 Método de respiración (hidróxido de potasio o KOH)

El método de respiración mediante el uso de Hidróxido de Potasio o KOH se ha consolidado como una técnica efectiva para cuantificar la tasa de respiración del suelo. Según Lavelle et al. (2016), este método implica la utilización de KOH para capturar el dióxido de carbono (CO₂) liberado por el suelo durante un período específico, siendo la duración de la incubación de 4 días a temperatura ambiente.

Durante el proceso, el KOH actúa como absorbente del CO₂, dando lugar a una reacción química con el dióxido de carbono en la que se forma carbonato de potasio (K₂CO₃). La cantidad de CO₂ absorbido por el KOH proporciona la base para calcular la tasa de respiración del suelo. Este valor se expresa comúnmente en unidades de gramos de CO₂ por unidad de área y tiempo, según lo indicado por Lavelle et al. (2016). Este método brinda una perspectiva precisa de la actividad

respiratoria del suelo y contribuye significativamente a la comprensión de los procesos biológicos en el entorno edáfico.

2.6.3 Método microBIOMETER

Es una herramienta portátil e innovadora diseñada para estimar de manera rápida y sencilla la biomasa microbiana presente en el suelo, expresada comúnmente en microgramos de carbono microbiano por gramo de suelo ($\mu\text{g C g}^{-1}$). Esta metodología ha sido ampliamente adoptada en contextos de agricultura orgánica y regenerativa debido a su facilidad de aplicación, rapidez en resultados y la ventaja de no requerir reactivos peligrosos ni equipos de laboratorio costosos (Gordon, 2021).

Su función se basa en una reacción colorimétrica que detecta compuestos intracelulares de carbono propios de los microorganismos del suelo, a medida que la intensidad de color resultante es capturada mediante un filtro y analizada con una aplicación móvil, permitiendo una evaluación inmediata masa microbiana. Esta técnica permite tener resultados en un tiempo aproximado de 20 minutos, lo que facilita un monitoreo continuo del estado biológico del suelo.

Asimismo, la comparación realizadas por Laine et al. (2025) entre métodos como PLFA, qPCR, ddPCR y microBIOMETER mostró que el análisis de ácidos grasos de fosfolípidos (PLFA) es el más preciso y repetible, siendo ampliamente utilizado en estudios científicos aunque microBIOMETER representa una alternativa de bajo costo para medir la biomasa microbiana, sus resultados para la relación F/B no son comparables con los otros métodos.

2.6.4 Relación entre variables químicas y biológicas del suelo

El suelo constituye un sistema dinámico y complejo, en el cual las propiedades químicas y biológicas interactúan de manera continua para sostener su fertilidad y funcionalidad ecológica. Parámetros químicos como el pH, el contenido de materia orgánica, los niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), ejercen una influencia directa sobre la estructura y la actividad de las comunidades microbianas edáficas (Beltrán et al., 2017).

De la misma manera, la biomasa microbiana y su actividad metabólica desempeñan un papel crucial en procesos como la mineralización de nutrientes, la formación de agregados estables en el suelo y la supresión de organismos patógenos, lo que las convierte en indicadores biológicos fundamentales para evaluar la calidad del suelo. Por lo tanto, el análisis conjunto de variables

químicas y biológicas ofrece una visión integral del estado de salud y fertilidad de los ecosistemas edáficos (Doran y Zeiss, 2000).

2.7. Marco Legal

La presente investigación se relaciona con ciertos objetivos, artículos y leyes que se encuentran en vigencia en el territorio nacional y a nivel internacional. Con base en el artículo 14, sección segunda de la Constitución de la República del 2008, se reconoce el derecho de los ciudadanos a vivir en un ambiente sano, equilibrado y sostenible, que garantice el buen vivir. Así como se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad, la integridad del patrimonio genético, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios degradados. Además, en el artículo 71, capítulo 7, se reconoce el derecho de la naturaleza a ser respetada su existencia, mantenimiento y regeneración.

De igual manera, de acuerdo al Plan de Creación de Oportunidades 2021 – 2025, la investigación se ajusta con objetivo 12, dado que se busca promover modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático.

Por otro lado, la Ley Orgánica de Sanidad Agropecuaria en el artículo 3, por su parte considera fundamental establecer medidas fito y zoonosanitarias, con el objetivo de asegurar el bienestar de las personas, los animales y también mantener la inocuidad de los vegetales de manera que no representen un riesgo para quienes lo consumen.

Así también, el estudio se vincula con el cumplimiento de al menos 5 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por las Naciones Unidas el 25 de septiembre del 2015, los cuáles son: hambre cero (2), salud y bienestar (3), producción y consumo responsable (12), acción por el clima (13) y vida de ecosistemas terrestres (15).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

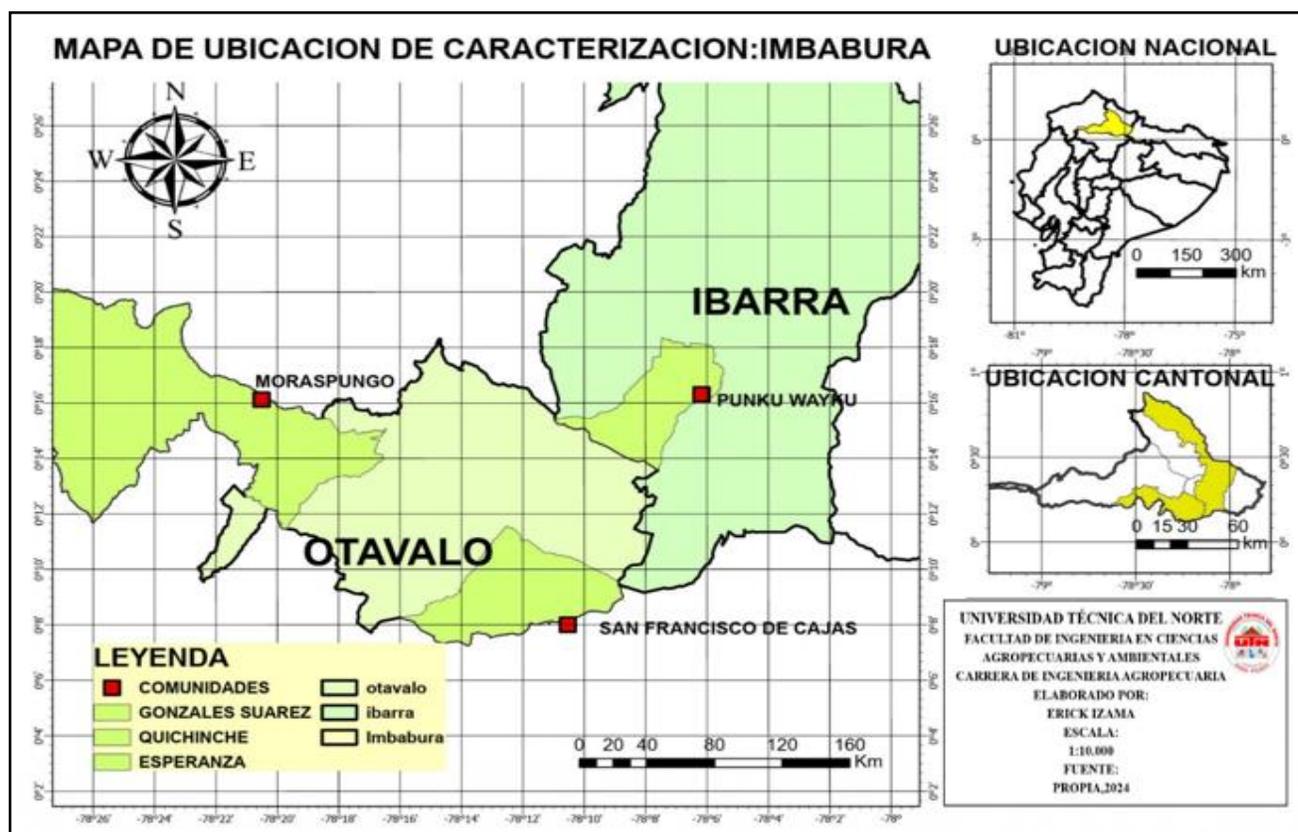
3.1. Caracterización del área de estudio

3.1.1 Ubicación del área de estudio

El presente trabajo de investigación se lo realizó en tres comunidades localizadas en distintas parroquias de la provincia de Imbabura, tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Mapa de ubicación de las distintas localidades y agroecosistemas.



Las características geográficas y climáticas de las áreas de estudio se detallan en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1*Características geográficas de las zonas de estudio*

Información	Comunidad		
	Punkuwayku	San Francisco de Cajas	San Miguel de Moraspungo
Provincia	Imbabura	Imbabura	Imbabura
Cantón	Ibarra	Otavalo	Otavalo
Parroquia	La Esperanza	Gonzales Suárez	Quichinche
Altitud (m.s.n.m)	2400	2694	2900
Superficie (km ²)	1.8	41	20
Temperatura	22 °C	18 °C	19 °C

3.2. Materiales, equipos, insumos y herramientas

Los materiales, equipos, insumos y herramientas que se utilizaron en el desarrollo de la investigación se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2

Materiales, equipos, insumos y herramientas utilizados en el trabajo de investigación para medir la emisión de CO₂ mediante los métodos Solvita, hidróxido de potasio e identificar la masa microbiana

Materiales	Equipos	Insumos	Herramientas
- Tamiz (2 mm)	- Balanza	- Solvita	- Pinzas
- Funda con sellante hermético	- Medidor de pH	- KOH	- Pipeta de 10 ml
- Rodillo de suelo	- Software	- Agua destilada	- Puntas de pipeta
- Bandeja	microBIOMETER	- Polvo de extracción	- Tarjeta medidora
- Vaso plástico			- Jeringa
- Frasco con tapa hermético			- Tubo de extracción
- Frascos con tapa de boca ancha			
- Cinta de rotular			
- Marcadores			
- Papel filtro			
- Papel aluminio			
- Vaso de precipitación			
- Guantes			
- Rejilla para tarros			
- Cuaderno de registro			

3.3. Métodos

La metodología de la investigación es de tipo descriptiva, la cual permitió determinar la salud del suelo de parcelas agrícolas con diferentes manejos, en las comunidades bajo estudio.

3.3.1 Población y muestra

No se tiene una población y muestra específica para cada comunidad. Las fincas fueron seleccionadas en función de su representatividad y la diversidad de agroecosistemas presentes, en colaboración con la fundación EkoRural, una organización dedicada a promover prácticas sostenibles enfocadas en la salud del suelo. Es importante destacar que estas fincas no cuentan con antecedentes previos de estudios relacionados con emisiones de CO₂, masa microbiana, contenido de macro y micronutrientes o salud del suelo, por lo que este trabajo de investigación constituye un aporte inicial valioso para la generación de datos que podrán ser utilizados en futuros estudios.

La selección de las fincas también consideró la cooperación activa de los propietarios, quienes aportaron información clave sobre el manejo histórico de los terrenos y facilitaron el acceso para la implementación de las metodologías de investigación. En estas fincas se identificaron cinco tipos de agroecosistemas: natural, degradado, convencional, barbecho y agroecológico.

Tabla 3

Características generales de los agroecosistemas evaluados en las áreas de estudio

Agroecosistema	Caraterísticas generales
Natural	El sistema natural se caracterizó por corresponder a un bosque ubicado en el interior de una quebrada, conformado por grandes rocas de origen fluvial, suelos de textura arenosa, esto en la comunidad de Punku Wayku. No obstante, en las otras dos localidades (San Francisco de Cajas y San Miguel de Moras Pungo) se evidenció áreas no intervenidas directamente por actividades agrícolas, conservando la estructura y biodiversidad original
Agroecológico	El sistema agroecológico se distinguió por la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, fundamentales para promover la seguridad alimentaria. Dentro de las comunidades se observaron cercas vivas y una notable diversidad de cultivos, entre los cuales se identificaron especies como maíz, hortalizas, cultivos de ciclo corto y perennes. Cabe señalar que la cobertura vegetal al interior de la parcela era limitada; no obstante, en los alrededores predominaba la vegetación arvense.
Barbecho	Este se caracterizó por terrenos que han sido sometidos a períodos de descanso sin cultivo durante un año, con el objetivo de restaurar parcialmente su fertilidad.
Convencional	Se basó en el empleo de sistemas agrícolas que utilizan fertilizantes, agroquímicos e incluso las practicas tradicionales. En este sistema predominaron cultivos como maíz, fréjol, papas y habas. Asimismo, presentaron cobertura de vegetación arvense.
Degradado	Suelos deteriorados por prácticas inadecuadas, suelos compactados, monocultivos o mal manejo de recursos.

El estudio se realizó en San Francisco de Cajas y Pubkuwayku, donde grupos de mujeres implementan prácticas agroecológicas para lograr una producción más sostenible, enfocándose en la mejora de la salud del suelo y la biodiversidad mediante técnicas como el uso de abonos naturales y la rotación de cultivos. Estas comunidades han implementado diversas estrategias para mejorar la salud del suelo y la biodiversidad, priorizando el uso de insumos orgánicos y técnicas que favorecen el equilibrio ecológico, como el uso de abonos naturales, la rotación de cultivos y la integración de animales para la fertilización. Las mujeres en estas localidades juegan un papel fundamental en la transición hacia modelos agrícolas más respetuosos con el medio ambiente, promoviendo la autosuficiencia y el fortalecimiento de la economía local.

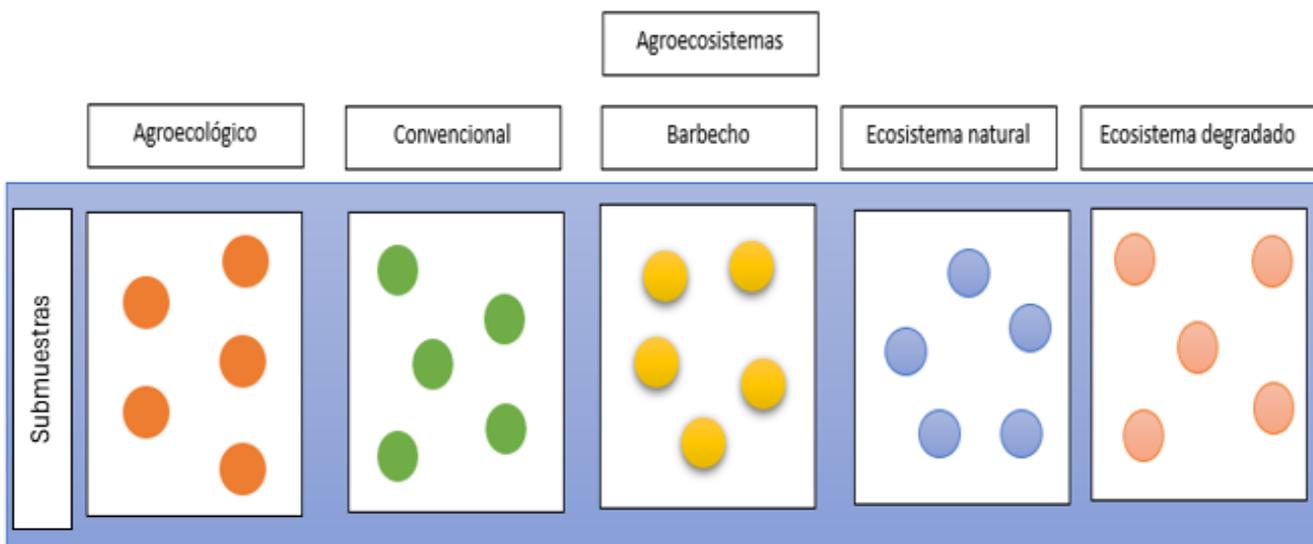
La tercera localidad, San Miguel de Moras Pungo, es una finca familiar que combina los cinco tipos de agroecosistemas mencionados en la Tabla 3. Esta familia maneja de forma integral los diferentes sistemas productivos, lo que permite observar la interacción entre estos sistemas y sus efectos en la sostenibilidad agrícola.

3.3.2 Unidad muestral

En cada comunidad se identificaron los diferentes agroecosistemas y se procedió a tomar aleatoriamente cinco submuestras de suelo en cada uno de estos agroecosistemas. Posteriormente se formó una sola muestra homogeneizada para cada agroecosistema. Sobre estas muestras se realizaron todos los análisis presentados en esta investigación.

Figura 3

Muestreo completamente al azar para las tres localidades.



El muestreo al azar aplicado en este estudio tuvo como objetivo minimizar la variabilidad en los resultados obtenidos, asegurando una representación imparcial del suelo de cada agroecosistema. Este enfoque permite comparar los distintos sistemas de manejo del suelo y sus efectos en la salud del mismo, proporcionando una línea base para futuros estudios.

3.3.3 Análisis estadístico

Los análisis de datos se realizaron mediante el programa estadístico InfoStat. Para determinar el análisis estadístico se efectuó mediante coeficientes de correlaciones y gráficos con los datos obtenidos de las metodologías descritas; test Solvita, hidróxido de potasio y masa microbiana.

Para las variables descritas en los análisis de suelo se realizó un análisis descriptivo.

3.4. Variables evaluadas

3.4.1 Correlación entre la emisión de CO₂ medida por los métodos Solvita y KOH

Emisión de CO₂ total (método test Solvita)

Para evaluar la variable emisión de CO₂, se utilizó la metodología test Solvita que permite medir la emisión de dióxido de carbono generada por el suelo tamizado en un periodo específico. Este procedimiento se llevó a cabo con 15 muestras previamente secas a temperatura ambiente. Los pasos seguidos para evaluar la respiración basal del suelo fueron los siguientes:

Las muestras de suelo fueron expuestas a temperatura ambiente durante 24 horas (Figura 4) para asegurar una adecuada eliminación de CO₂ residual.

Figura 4

Muestras expuestas a temperatura ambiente.



Las muestras fueron tamizadas utilizando una malla de 2 mm, triturando manualmente los agregados más grandes para obtener una textura uniforme como se aprecia en la Figura 5.

Figura 5

Tamizado de las muestras.



Posteriormente se utilizaron 30 g de suelo (Figura 6) por muestra, una cantidad estandarizada que se midió con los recipientes específicos incluidos en el kit Solvita.

Figura 6

Pesaje de las muestras de suelo.



Cada muestra fue rehidratada utilizando 9 ml de agua destilada (Figura 7), administrada con una jeringa de 20 ml para evitar la formación de grumos en la superficie.

Figura 7

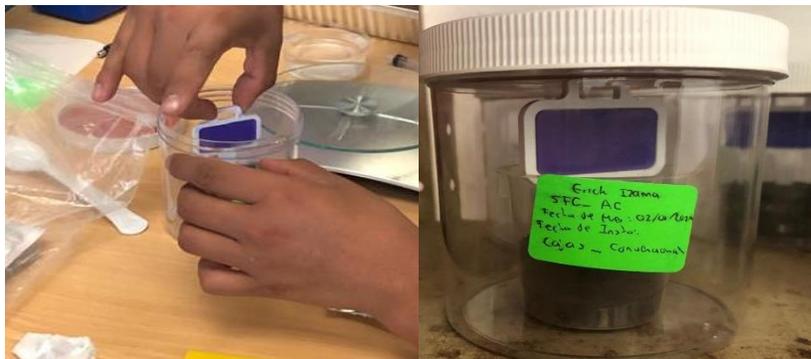
Rehidratación aplicada las muestras de suelo.



Una vez preparada la muestra, se colocó en el vaso medidor dentro del frasco hermético Solvita. A continuación, se insertó la sonda que mide la emisión de dióxido de carbono (Figura 8).

Figura 8

Aspirador empleado en la colecta de pequeños invertebrados.



Los frascos fueron sellados herméticamente y se dejaron reposar durante 24 horas para permitir la captura y medición del CO₂ emitido por las muestras como se aprecia en la Figura 9.

Figura 9

Frascos sellados y reposando para obtener la captura de CO₂.



Tras el periodo de reposo, se observó el cambio de color en el gel de la sonda Solvita (Figura 10). Este gel contiene compuestos químicos que permiten determinar la cantidad de CO₂ emitido, con valores que oscilan entre 0% y 3%.

Figura 10

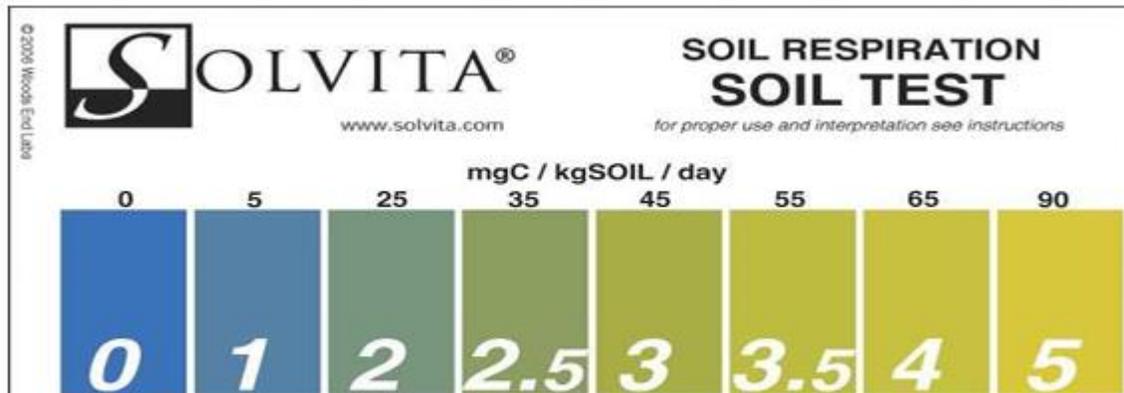
Cambio de color al pasar 24 horas de cada muestra de suelo.



Los datos obtenidos se interpretaron en función de la escala de colores del gel que se muestra en la Figura 11, transformándolos a miligramos de carbono (mgC) por kilogramo de suelo (kg de suelo) por día.

Figura 11

Colorímetro para determinar la respiración del suelo.



Fuente: (Sundermeier y Shedekar, 2019).

Emisión de CO₂ total (método con hidróxido de potasio o KOH)

Para el cumplimiento de la segunda variable, se empleó el método de incubación con KOH, para evaluar la mineralización de carbono a corto. Este método refleja la disponibilidad de carbono accesible para los microorganismos como fuente de energía. La técnica evalúa el dióxido de carbono liberado por la actividad microbiana bajo condiciones controladas de humedad y tiempo, utilizando la conductividad eléctrica como indicador para cuantificar las concentraciones de CO₂.

Lavelle et al., (2016) mencionan los pasos para evaluar la respiración:

Preparación de la muestra

- Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente como se muestra en la Figura 4 y posteriormente tamizadas para homogeneizarlas.
- En cada frasco de incubación, se colocaron dos tiras de papel filtro y una tira de papel aluminio previamente perforada (Figura 12).

Figura 12

Colocación de papel filtro y papel aluminio.



- Posteriormente se pesaron 20 g de suelo seco con una balanza de precisión (Figura 13).

Figura 13

Pesaje de las muestras de suelo.



- Las muestras se trasladaron a frascos herméticos que se utilizarían en la experimentación.

Preparación del sistema de respiración

- Los frascos con las muestras fueron acomodados en vasos de precipitación de 10 ml montados en la rejilla para tarros (Figura 14).

Figura 14

Rejilla para soportar los vasos precipitados de 10 ml.



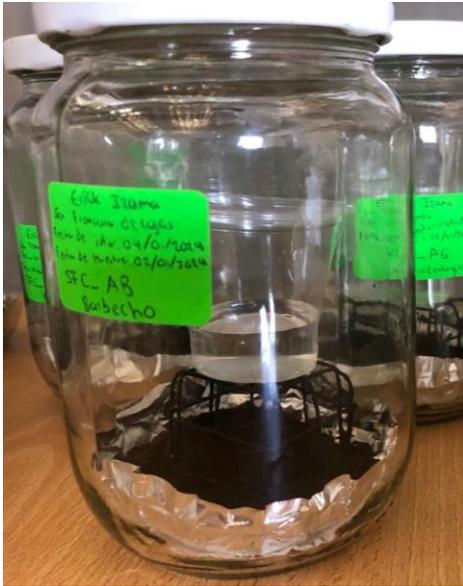
- Cada frasco fue equipado con una trampa de CO₂ diseñada para ajustar adecuadamente el bote de fondo plano al interior del vaso de precipitación.

Configuración del proceso de incubación

- Se añadieron 9 ml de KOH al 0.5 M a las muestras designadas.
- Se incorporaron 7.5 ml de agua destilada por las paredes del vaso de precipitación, utilizando una jeringa.
- Los frascos se sellaron herméticamente inmediatamente después de su preparación y se dejaron incubar durante 4 días. En la Figura 15 se muestra el prototipo armado del frasco para la incubación.

Figura 15

Prototipo de frasco de incubación.



Medición después de la incubación

- Se calibró el medidor de pH (Figura 16) y se prepararon las muestras para la medición de la conductividad eléctrica.
- El pHmetro fue introducido en las muestras, registrando los valores cuando la lectura del instrumento se estabilizó.

Figura 16

Calibración de pHmetro.



- Tras cada medición, se volvió a calibrar el equipo para asegurar resultados precisos.

Cálculos finales

Se sabe que 9 ml de KOH a 0.5 M es equivalente a 99.025 mg de CO₂, de lo cual solo un pequeño porcentaje es absorbido por lo que la resta de la conductividad eléctrica de una muestra en blanco y la conductividad eléctrica de una muestra con KOH se denomina caída de conductividad eléctrica observada. Esta cantidad es una fracción de la caída total posible, que podemos llamar "caída de EC de capacidad total". Al dividir la caída de EC observada por la caída de EC de capacidad total, se obtiene una fracción equivalente a la fracción de la capacidad total de trampa para la absorción de CO₂ que se utiliza. Por lo tanto, es clave que todas las mediciones se realicen a la misma temperatura. Si EC_{raw} es la conductividad eléctrica de KOH 0,5 M puro y EC_{sat} es la conductividad eléctrica de K₂CO₃ 0.25 M y EC_{sample} es la conductividad eléctrica de la trampa asociada con una muestra en particular, y P es la proporción de la capacidad de absorción de CO₂ de la trampa que es realmente usado.

A continuación, se presenta la siguiente ecuación para determinar la cantidad de CO₂ liberada de un suelo por la actividad microbiana.

$$\left(\frac{EC_{raw} - E_{muestra}}{EC_{raw}EC_{sat}}\right) = P$$

P*(capacidad de la trampa en mg) = mg de CO₂ absorbidos por la trampa en cuestión.

Donde:

- EC_{raw}: conductividad eléctrica de KOH 0.5 M puro
- EC_{sat}: conductividad eléctrica de K₂CO₃ 0.25 M
- EC_{sample}: conductividad eléctrica de la trampa asociada
- P: proporción de la capacidad de absorción de CO₂

Donde P representa la fracción de la capacidad total de absorción utilizada, y al multiplicarlo por la capacidad total de la trampa, se obtuvo la cantidad de CO₂ absorbido en miligramos.

3.4.2 Biomasa microbiana y proporción entre hongos y bacterias

La metodología utilizada para determinar la biomasa microbiana y proporción entre hongos y bacterias se detalla a continuación:

Preparación de la muestra

- En la preparación de las muestras se inició tamizando la tierra en una bandeja luego de haber realizado la colecta en las localidades (Figura 5), posteriormente se extrae la materia orgánica de gran tamaño, como piedras o ramas.
- Se agregó 10 ml de agua destilada en un tubo de medición. Posteriormente se añade el polvo de extracción en el tubo (Figura 17) y batir durante unos segundos, mezclando el polvo con la solución. Adición

Figura 17

Adición del polvo de extracción.



- Se mide el suelo muestreado 1 ml por medio de una jeringa (Figura 18). Adicionalmente, compactar el suelo hasta la marca de 0.5 ml, eliminar todo tipo de exceso y añadir la tierra en el tubo de extracción.

Figura 18

Colecta de 1 ml de suelo.



- Mezclar de solución durante 30 segundos, este movimiento ayuda en el proceso de extracción (Figura 19).

Figura 19

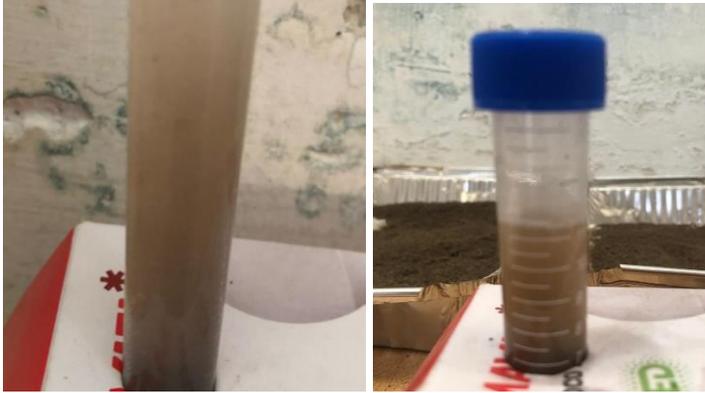
Distribución homogénea del suelo con el polvo de extracción.



- Se deja reposar el tubo de extracción durante 5 minutos. Adicionalmente, golpear el fondo del tubo para sedimentar los restos flotantes (Figura 20) y dejar en reposo durante 15 minutos.

Figura 20

Reposo de la solución para su posterior colecta.



- Se usa una pipeta para aspirar la solución por debajo de la superficie, evitando todo tipo de residuo.
- Se aplicó 3 gotas de solución en la tarjeta medidora hasta que la gota se absorba completamente, como se muestra en la Figura 21, evitar mojar la escala de grises que rodea la tarjeta.

Figura 21

Tarjeta de prueba microBIOMETER antes de la aplicación del software.



Fuente: (Gordon, 2021).

- Los resultados se obtendrán mediante el software microBIOMETER, analizar 2 minutos después de aplicar las gotas, alinear el cuadro azul de la pantalla con el cuadro negro de la tarjeta (Lavelle et al., 2016).

3.4.3 *Análisis de correlación entre variables químicas y biológicas*

Para la evaluación de variables químicas y biológicas presentes en el suelo se enviaron las muestras (15 muestras) al Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP.

Las variables consideradas para este análisis fueron las siguientes, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4

Comparación de variables químicas y biológicas del suelo

Variables
Solvita
KOH
Microbios
Hongos/Bacterias
MO
N
P
K
pH
Ca
Mg
Zn
Cu
Fe
Mn
Ca/Mg
Mg/K
(Ca+Mg/K)
Sumatoria de bases

3.5. Manejo específico del estudio

3.5.1 Selección e identificación de los agroecosistemas

Mediante un recorrido de campo en las comunidades de San Francisco de Cajas, Punkuwayku y San Miguel de Moraspungo (Figura 22), y en coordinación con representantes de la Fundación EkoRural, se llevó a cabo la identificación y selección de los cinco agroecosistemas previamente descritos en la Tabla 3.

Figura 22

Selección de parcelas representativas en las localidades de estudio.



3.5.2 Recolección de muestras de suelo

Se realizaron muestreos de suelo en cada parcela con una profundidad de 20 cm. En cada agroecosistema, se recolectaron 5 submuestras de suelo como se muestra en la Figura 23, que posteriormente se combinaron para formar una muestra compuesta representativa del lugar.

Figura 23

Proceso de recolección de muestras de suelos en los agroecosistemas seleccionados.



3.5.3 Empacado de muestras de suelo

Las muestras compuestas fueron empacadas en fundas con sellante hermético, como se observa en la Figura 24, asegurando la conservación de las propiedades del suelo hasta su análisis. Adicionalmente, cada muestra fue etiquetada adecuadamente, indicando la procedencia y el tipo de agroecosistema.

Figura 24

Empacado de muestras de suelo en fundas selladas para su conservación y análisis.



3.5.4 División de las muestras

Las muestras de suelo se dividieron en dos partes iguales para fines específicos:

Una parte fue enviada al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) para análisis de propiedades químicas-biológicas del suelo. Estos análisis se utilizaron para determinar la última variable del estudio (correlación entre variables químicas y biológicas) y la otra parte fue llevada a la Universidad Técnica del Norte para su análisis experimental (Figura 25).

Figura 25

División de las muestras de suelo para análisis en el INIAP y análisis experimental.



3.5.5 Análisis en la universidad

Las muestras recibidas en la universidad fueron sometidas a los siguientes procesos:

- Emisión de CO₂: Evaluada mediante los métodos Solvita y KOH.
- Identificación de masa microbiana y proporción entre hongos y bacterias: Determinación de los microorganismos presentes en el suelo mediante el software microBIOMETER.

3.5.6 Secado de muestras

Antes de los análisis, las muestras se secaron en una bandeja a temperatura ambiente para homogenizar la humedad y evitar alteraciones en los resultados (Figura 26).

Figura 26

Preparación de las muestras: secado a temperatura ambiente.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos de la investigación se detallan a continuación, organizados según cada variable examinada en el estudio.

4.1. Calibración entre la emisión de CO₂ medida por los métodos Solvita y KOH

La Figura 12 muestra el análisis de correlación entre la emisión de CO₂ mediante los métodos Solvita y KOH. Se muestra el coeficiente de correlación de Pearson y su nivel de significancia estadística, con el objetivo de evaluar la relación entre ambas metodologías.

Figura 27

Correlación entre las emisiones de CO₂ medidas por los métodos Solvita y KOH.

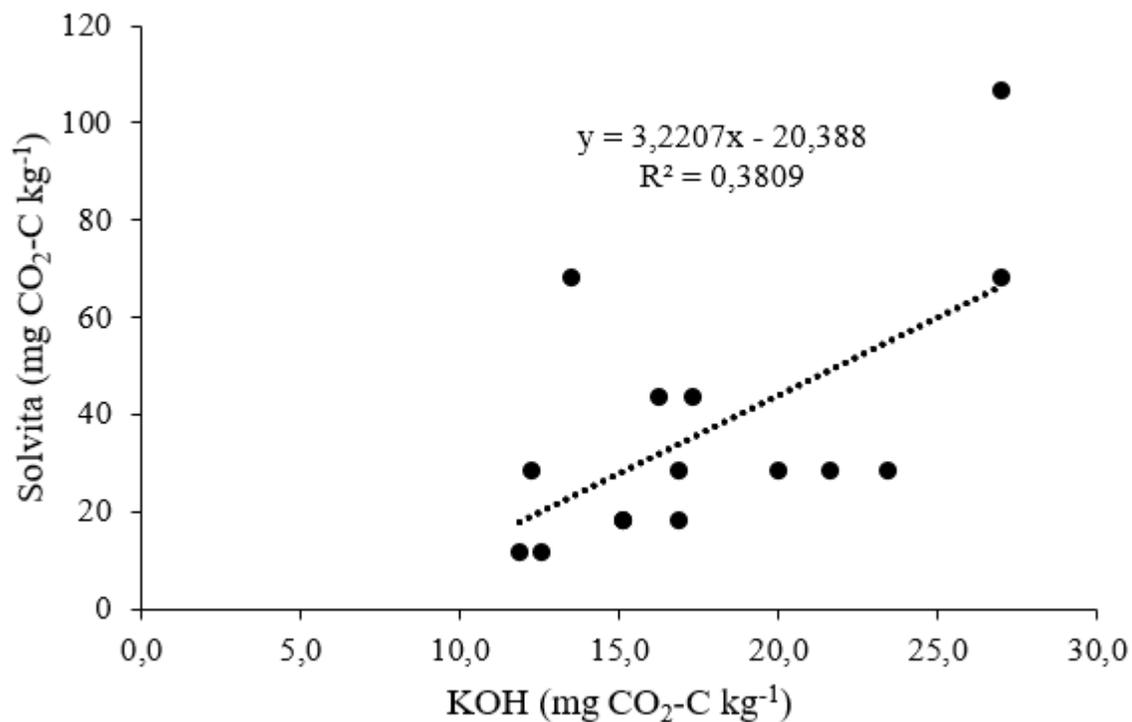


Tabla 5

Análisis de correlación entre los métodos Solvita y KOH para la medición de CO₂

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Solvita (mg CO ₂ -C kg ⁻¹)	KOH (mg CO ₂ -C kg ⁻¹)	15	0.62	0.01420

Los resultados en la Figura 12 y la Tabla 4 muestran la relación entre la emisión de CO₂ con los métodos Solvita y KOH a partir de 15 muestras. El coeficiente de correlación de Pearson es de 0.62, esto indica una relación positiva moderada entre ambas variables, lo que sugiere que a medida que aumentan los valores obtenidos con Solvita, también tienden a aumentar los valores medidos con KOH.

Además, el p-valor (0.0142) indica que esta correlación es estadísticamente significativa, ya que es menor a 0.05. Esto implica que la relación observada entre ambas mediciones presenta una conexión real entre los métodos evaluados.

Un estudio en suelos clasificados como Andic Humudepts encontró un comportamiento diferencial en la respiración del suelo entre el método Solvita y el uso de tubos colorimétricos destacando que factores como la temperatura, el pH, la humedad del suelo y el uso de agroquímicos pueden influir significativamente en las emisiones de CO₂ (Muñoz, 2022). Los resultados obtenidos no exploran directamente estos factores, pero sugieren que la correlación entre los métodos podría verse afectada por condiciones ambientales similares.

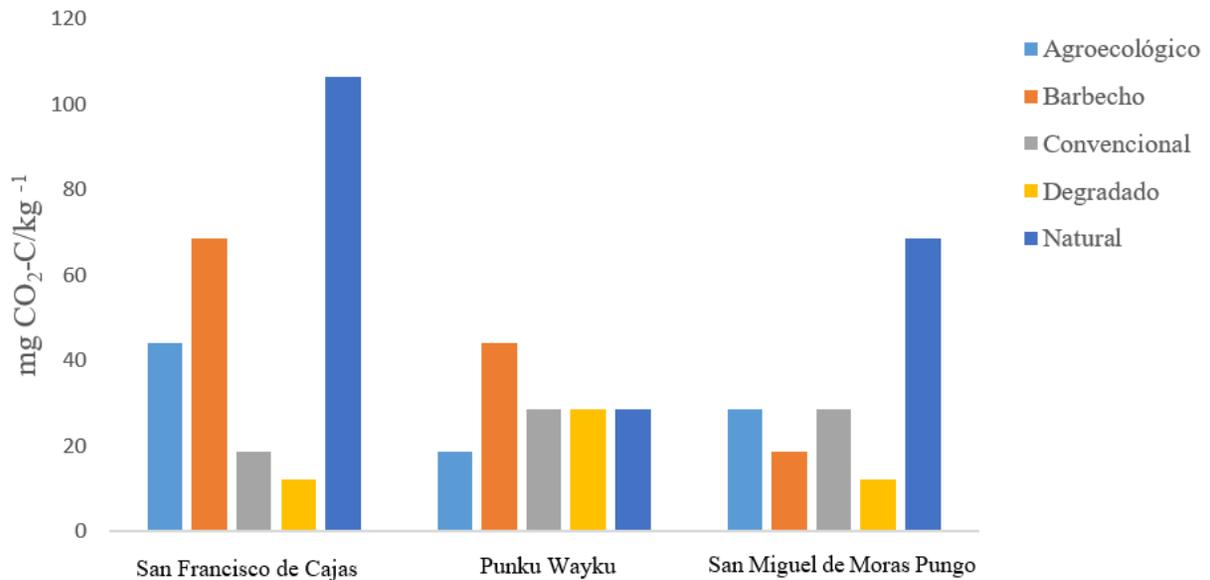
Finalmente, los datos sugieren que el método Solvita puede ser una alternativa viable para estimar la emisión de CO₂ en comparación con el método KOH. Sin embargo, dado que la correlación no es lo suficientemente alta como para considerarlos completamente equivalentes, podría ser necesario seguir experimentando su relación en diferentes condiciones experimentales y con un número mayor de muestras.

4.1.1 Emisión de CO₂ total (método test Solvita)

A través de la Figura 12 se puede evidenciar que, la emisión de CO₂ por el método test Solvita, muestran variaciones en los distintos agroecosistemas de las distintas comunidades, resaltando la comunidad San Francisco de Cajas con una emisión cercana a 115 de CO₂.

Figura 28

Emisión de CO₂ presente en diferentes localidades y agroecosistemas mediante el método Solvita.



En la Figura 12, se puede apreciar los resultados obtenidos mediante el método Solvita que muestran claras diferencias en la emisión de CO₂ entre los agroecosistemas evaluados, siendo los suelos naturales los que presentaron la mayor actividad microbiana, especialmente en San Francisco de Cajas, donde se alcanzó un valor máximo de 106.5 mg CO₂-C kg⁻¹. En este sentido, en la comunidad San Francisco de Cajas, el suelo bajo manejo natural presentó la mayor emisión de CO₂, superando al agroecosistema degradado por 88%. Adicionalmente, los agroecosistemas barbecho y agroecológico superaron por 82% y 72%, respectivamente, al agroecosistema degradado; mientras que el agroecosistema convencional lo superó por 35%. Este patrón es coherente con los hallazgos de (Brinton y Vallotton, 2019), quien validó el método Solvita contra sensores de análisis de gases por infrarrojo (IRGA) y encontró una alta correlación ($R^2 = 0.887$), indicando que este sistema es confiable para cuantificar la respiración microbiana del suelo. De la misma manera, este hallazgo es consistente con lo que han señalado (Montenegro et al., 2022),

quienes enfatizan que un alto contenido de materia orgánica y prácticas de manejo sostenibles intensifican la actividad microbiana, resultando en una mayor respiración del suelo.

Asimismo, Chatterjee y Acharya (2018) reportaron correlaciones significativas entre los valores de CO₂ y otros indicadores de salud del suelo, como la biomasa microbiana ($R^2 = 0.57$) y carbono oxidable ($R^2 = 0.68$), lo que respalda la interpretación de que los suelos con mayor emisión de CO₂ tienen también un microbiota más activa y funcional.

Curiosamente, en la comunidad de Punku Wayku, los agroecosistemas degradado, convencional y natural presentaron la misma cantidad de emisiones de CO₂. A su vez, estas emisiones superaron al agroecosistema agroecológico por 35%. Esto sugiere que, en esta comunidad, las condiciones del suelo y el manejo pueden ser menos favorables para la actividad microbiana en comparación con San Francisco de Cajas. Adicionalmente, el agroecosistema barbecho presentó 35% más de emisiones de CO₂ que el agroecosistema degradado, lo que respalda la idea de que el barbecho permite la recuperación de nutrientes y biodiversidad del suelo, tal como lo mencionan Carbonell et al. (2011), quienes encontraron que los suelos en barbecho pueden reducir las emisiones de CO₂ en comparación con suelos cultivados continuamente.

En cuanto a la comunidad San Miguel de Moras Pungo, el agroecosistema que mayor emisión de mg CO₂-C kg⁻¹ presentó fue el natural, superando al agroecosistema degradado con 82%. Mientras los agroecosistemas agroecológico y convencional superaron por 57% al mismo agroecosistema. Del mismo modo, las emisiones de CO₂ del agroecosistema barbecho superaron por 35% a lo observado en el suelo del agroecosistema degradado. Esto refuerza la observación expuesta por Haney et al. (2008), quienes indicaron que la pérdida de materia orgánica reduce considerablemente la actividad respiratoria del suelo.

El agroecosistema agroecológico mostró emisiones que oscilaron entre 18.5 y 44 mg CO₂-C kg⁻¹, siendo San Francisco de Cajas la que mayor emisión presentó, superando a San Miguel de Moras Pungo en 35%, la cual a su vez supera a Punku Wayku por el mismo porcentaje. Este patrón se alinea con el estudio de (Altieri y Nicholls, 2017), que indica que los sistemas agroecológicos pueden reducir las emisiones de CO₂ en comparación con la agricultura convencional.

Por otro lado, el agroecosistema barbecho, obtuvo valores de emisión entre 18.5 y 68.5 mg CO₂-C kg⁻¹, donde San Francisco de Cajas nuevamente registró las mayores emisiones, superando a

Punku Wayku por 35% y a San Miguel de Moras Pungo por 58%. Los valores intermedios de CO₂ coinciden con estudios de Moore et al. (2019), quienes demostraron la sensibilidad del método para reflejar cambios en el carbono activo y nitrógeno en suelos agrícolas, lo cual podría explicar el mayor potencial de regeneración biológica en estos sistemas en comparación con los demás sistemas.

Ahora bien, el agroecosistema convencional presentó rangos de emisión de CO₂ que oscilaron entre 18.5 y 28.5, con Punku Wayku y San Miguel de Moras Pungo reportando valores iguales. Ambas comunidades tienen 35% más que lo registrado en San Francisco de Cajas, lo que sugiere que el uso intensivo de insumos químicos y monocultivos en la agricultura convencional puede estar asociado con menores emisiones de CO₂, respaldando la afirmación de Smith et al. (2008) de que los suelos manejados convencionalmente pueden emitir hasta un 50% más de CO₂ en comparación con los sistemas agroecológicos.

Con respecto al agroecosistema degradado mostró los rangos más bajos de emisión de CO₂, con San Francisco de Cajas y San Miguel de Moras Pungo registrando valores iguales de 12 mg CO₂-C kg⁻¹, lo que representa un 58% menos que lo reportado en Punku Wayku, la comunidad que mostró las mayores emisiones. Esto sugiere que la degradación del suelo, caracterizada por erosión, compactación y pérdida de materia orgánica, puede contribuir a una menor actividad microbiana y, por ende, a menores emisiones de CO₂, aunque la liberación de carbono almacenado puede tener implicaciones significativas para el cambio climático, como señala Lal (2004).

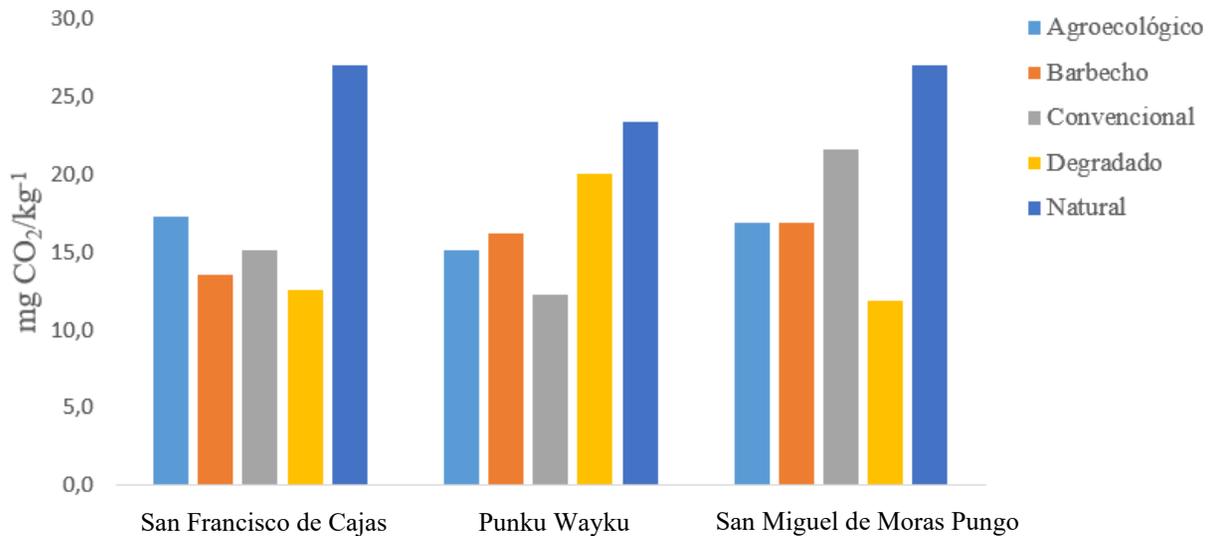
Finalmente, el agroecosistema natural, se obtuvieron valores de emisión que fluctuaron entre 28.5 y 106.5. Siendo la comunidad San Francisco de Cajas la que mayor emisión de CO₂, teniendo 35% más que lo obtenido en la comunidad San Miguel de Moras Pungo. Esto se debe a que los sistemas naturales tienden a tener una mayor capacidad de almacenamiento de carbono, lo que se traduce en mayores emisiones de CO₂, como lo reportan (Hanson et al., 2015). Adicionalmente, la comunidad de Punku Wayku fue la que menor emisión registró, siendo superada por la comunidad San Miguel de Moras Pungo por 58%. En conjunto, estos hallazgos confirman que el método colorimétrico Solvita, si bien sensible a condiciones experimentales, es una herramienta útil, validada y aplicable en la evaluación de emisiones de CO₂ como indicador indirecto de la salud y funcionalidad de los agroecosistemas.

4.1.2 Emisión de CO₂ total (método con hidróxido de potasio o KOH)

Como se muestra en la Figura 12 en la variable emisión de CO₂ por el método KOH se muestra las emisiones de dióxido de carbono en cinco tipos de agroecosistemas en las comunidades de San Francisco de Cajas, Punku Wayku y San Miguel de Moraspungo. El agroecosistema natural registra las mayores emisiones de CO₂ en todas las localidades, con un máximo en San Francisco de Cajas y San Miguel de Moraspungo cercano a los 30 mg CO₂, reflejando su mayor actividad biológica.

Figura 29

Cantidad de emisión de CO₂ presentes en diferentes localidades y agroecosistemas mediante el método hidróxido de potasio.



En la Figura 13, se muestra una clara variabilidad en la emisión de CO₂ en los agroecosistemas estudiados. En la comunidad de San Francisco de Cajas, el agroecosistema natural registró la mayor emisión de CO₂, superando al agroecosistema degradado en un 53%. Lal (2004) menciona estudios previos, que los ecosistemas naturales liberan mayor cantidad de CO₂ debido a su fertilidad y estabilidad en la materia orgánica. A su vez, los agroecosistemas agroecológico y convencional lo superaron en un 27% y 17%, respectivamente. Adicionalmente, el agroecosistema barbecho superó al agroecosistema degradado en un 7%. Este patrón de emisiones sugiere que los agroecosistemas naturales, al contar con una mayor diversidad biológica y una mejor gestión de la materia orgánica, favorecen la actividad microbiana, lo que se traduce en mayores emisiones de CO₂. Esto está en línea con lo que han observado estudios previos, como el de (Montenegro et al.,

2022), que destacan el papel de los sistemas naturales en la promoción de procesos de descomposición y respiración del suelo.

Por otro lado, Bekku et al. (1997) compararon cuatro métodos para medir la respiración del suelo, incluyendo el método de absorción de CO₂ con KOH. En su estudio, los valores más altos de emisión también se registraron en suelos con mayor cobertura vegetal y menor perturbación, en coherencia con nuestros resultados en agroecosistemas naturales y convencionales.

Por otra parte, en la comunidad de Punku Wayku, la mayor emisión de dióxido de carbono se registró en el agroecosistema natural, superando al agroecosistema degradado en un 15%. Es curioso que la emisión de CO₂ en el agroecosistema degradado sea superior a los agroecosistema agroecológico y barbecho por 35 y 30% respectivamente. Del mismo modo, el agroecosistema convencional fue inferior en un 48% al agroecosistema degradado. Este hallazgo refuerza la idea de que las prácticas de manejo que promueven la salud del suelo son cruciales para aumentar la actividad biológica y las emisiones de CO₂.

En la comunidad San Miguel de Moras Pungo, la mayor emisión de CO₂ se registró en el agroecosistema natural, superando al agroecosistema degradado en un 56%. Además, el agroecosistema convencional superó al degradado en un 45%, mientras que los agroecosistemas barbecho y agroecológico mostraron valores idénticos, ambos superando al agroecosistema degradado en un 30%. Esto indica que, en general, los agroecosistemas naturales y convencionales tienden a tener una mayor actividad microbiana, lo que se traduce en mayores emisiones de CO₂, corroborando los hallazgos de (Murray et al., 2015), quienes encontraron que las prácticas de conservación del suelo pueden influir significativamente en las emisiones de CO₂. Asimismo, investigaciones recientes sobre captura de CO₂ mediante KOH, como las de Ghavamipour et al. (2024) destacan la alta eficiencia del KOH para atrapar el CO₂ en condiciones variables. Esto respalda la validez del método empleado en el presente estudio, como es en precisión y en sensibilidad para detectar variaciones entre agroecosistemas.

En cuanto al agroecosistema agroecológico, se mostraron rangos de emisión entre 15.1 y 17.3 mg de CO₂, donde la mayor emisión fue registrada en la comunidad San Francisco de Cajas, superando a Punku Wayku por un 13%, mientras que esta última fue superada por San Miguel de Moras Pungo en un 11%. Esto sugiere que las prácticas agroecológicas, aunque intermedias, pueden ser efectivas para mantener una actividad microbiana saludable en el suelo. Estas prácticas, como la

rotación de cultivos y el uso de abonos orgánicos, pueden mejorar la salud del suelo y aumentar la respiración del suelo en comparación con suelos degradados, respaldando la idea de que la agricultura sostenible puede mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Hanson et al., 2015).

Con respecto al agroecosistema barbecho, se presentaron emisiones de CO₂ que fluctuaron entre 13.5 y 16.9 mg. Las comunidades San Miguel de Moras Pungo y Punku Wayku mostraron emisiones similares, con una diferencia del 4%. La comunidad de San Miguel de Moras Pungo fue la que mostró la mayor emisión, superando a la comunidad San Francisco de Cajas por un 20%. Esto indica que el barbecho puede ser una estrategia efectiva para la recuperación del suelo, aunque su efectividad depende de la duración y manejo del mismo. Sin embargo, como señalan Billings et al. (2010), si el barbecho es demasiado corto o mal manejado, puede no ser efectivo en la reducción de emisiones de CO₂.

Ahora bien, el agroecosistema convencional registró emisiones que oscilaron entre 12.2 y 21.6 mg de CO₂, donde la mayor emisión se presentó en San Miguel de Moras Pungo, superando a San Francisco de Cajas y Punku Wayku en un 30% y 43%, respectivamente. La comunidad Punku Wayku fue la que menos emisiones de CO₂ registró, lo que puede ser indicativo de un manejo menos intensivo o de condiciones menos favorables para la actividad microbiana. Este hallazgo es consistente con los resultados de (Smith et al., 2008), quienes señalaron que la intensificación agrícola, caracterizada por el uso excesivo de insumos químicos y monocultivos, puede contribuir a tener emisiones bajas.

Por otro lado, el agroecosistema degradado mostró emisiones de dióxido de carbono que fluctuaron entre 11.9 y 20 mg. Las comunidades San Francisco de Cajas y San Miguel de Moras Pungo reportaron datos similares, siendo San Francisco de Cajas un 5% mayor. Estas comunidades se diferencian de Punku Wayku por un 37% y 40%, respectivamente, siendo Punku Wayku la que registró la menor emisión de CO₂. Esto indica que los suelos degradados, aunque presentan emisiones moderadas, aún pueden ser mejorados mediante prácticas de manejo adecuadas. La degradación del suelo, frecuentemente causada por prácticas agrícolas insostenibles, puede llevar a una menor liberación de dióxido de carbono, como lo han señalado (Powlson et al., 2011).

Finalmente, en el agroecosistema natural, las emisiones de CO₂ fueron altas, con rangos entre 23.4 y 27 mg de CO₂. Tanto la comunidad de San Francisco de Cajas como la comunidad San Miguel

de Moras Pungo registraron la emisión más alta, obteniendo ambas el mismo valor. Estas comunidades superan a Punku Wayku por un 13%, lo que refuerza la idea de que los ecosistemas naturales favorecen una mayor actividad biológica y, por ende, mayores emisiones de CO₂. (Smirnova et al. (2014) utilizaron una solución de KOH al 0.5 Molar en un sistema Respicond VI y registraron emisiones que oscilaban entre 10 y 28 mg CO₂ kg⁻¹ en suelos agrícolas de Europa dependiendo de la temperatura y el contenido de humedad. Estos rangos son comparables con los encontrados en esta investigación, especialmente en los agroecosistemas naturales de las tres localidades. Esta coincidencia reafirma la idea de que los suelos con una concentración mayor de materia orgánica y estabilidad estructural tienen una mayor capacidad de respiración microbiana, como se ha mostrado en los sistemas naturales europeos.

Un estudio de Rastegar y Ghaemi (2022) mencionan que la absorción de CO₂ en soluciones acuosas de KOH mediante condiciones controladas de laboratorio indicaron que la eficiencia de captura de CO₂ depende significativamente de la concentración de KOH, la presión y la temperatura.

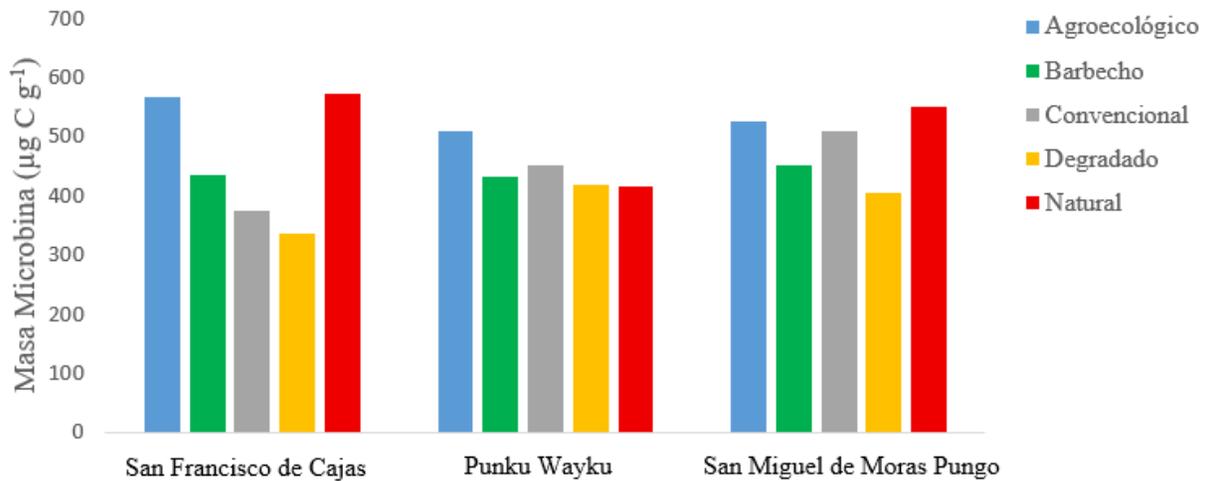
4.2. MicroBIOMETER

4.2.1 Masa microbiana

Los resultados, para la variable masa microbiana, muestra el número de microorganismos en cinco tipos de agroecosistemas (Tabla 3) en las tres comunidades. En donde el agroecosistema natural registra los valores más altos en todas las comunidades, alcanzando su máximo en San Francisco de Cajas con cerca de $600 \mu\text{g C g}^{-1}$, lo que refleja un ecosistema con alta actividad biológica.

Figura 30

Masa microbiana presente en diferentes localidades y tipos de agroecosistemas.



De acuerdo con los datos obtenidos, en la Figura 14, se observa que, en la comunidad de San Francisco de Cajas, los agroecosistemas natural y agroecológico son los que presentaron mayor cantidad de masa microbiana por gramo de suelo. Estos agroecosistemas muestran valores bastante similares entre sí, siendo superiores por 70% al observado en el agroecosistema degradado. Este resultado resalta que los suelos manejados bajo prácticas sostenibles como la agricultura agroecológica o la conservación de áreas naturales tienden a mantener una biomasa microbiana dentro del rango óptimo de 230 a $600 \mu\text{g C g}^{-1}$ (Schnürer et al., 1985).

De la misma manera, la disminución de la masa microbiana en suelos degradados puede atribuirse a prácticas agrícolas intensivas que afectan negativamente la estructura del suelo y reducen la diversidad microbiana (Bardgett y Van Der Putten, 2014). Adicionalmente, el agroecosistema de barbecho presentó 30% más de masa microbiana que el degradado; la práctica del barbecho

permite que el suelo se recupere y se regenere, favoreciendo el crecimiento microbiano y mejorando la fertilidad del suelo (Altieri, 1999), mientras que, el agroecosistema convencional lo superó por 9%. Estos resultados son consistentes con lo observado en estudios como el de Gordon (2021), quien evaluó el desempeño del método microBIOMETER frente a métodos tradicionales como el CFE, confirmando la sensibilidad para distinguir la masa microbiana entre tipos de manejo del suelo.

Por otra parte, en la comunidad Punku Wayku, el agroecosistema agroecológico fue el que mayor masa microbiana registro en su suelo, superando a los agroecosistemas degradado y natural en 22%. Del mismo modo, el agroecosistema barbecho supera a los agroecosistemas natural y degradado en 3%; mientras que, el ecosistema convencional lo supera en 8%.

Adicionalmente, en la comunidad San Miguel de Moras Pungo, el agroecosistema que mejores resultados presento fue el natural superando al agroecosistema degradado en 36%. Del mismo modo, los agroecosistemas que obtuvieron resultados similares fueron el agroecológico, convencional, diferenciándose con el degradado en 30 y 26% respectivamente. Además, el agroecosistema barbecho presento 12% adicional de masa microbiana que el agroecosistema degradado.

Con respecto al agroecosistema agroecológico, se observó que el rango de masa microbiana varió de 509 a 565 $\mu\text{g C g}^{-1}$, perteneciendo estos valores a las comunidades Punku Wayku y San Francisco de Cajas, respectivamente. Esto puede estar relacionado con factores como el manejo del suelo, la rotación de cultivos y las prácticas de fertilización orgánica que son comunes en sistemas agroecológicos (Tschumi et al., 2016). El valor registrado en la Comunidad San Francisco de Cajas superó al registrado en la comunidad Punku Wayku por 11%; mientras que el valor observado en la comunidad de San Miguel de Moraspungo lo superó por 3%.

Por otro lado, el agroecosistema Barbecho, la comunidad Punku Wayku obtuvo el nivel más bajo de masa microbiana con 430 $\mu\text{g C g}^{-1}$, siendo similar a lo encontrado en San Francisco de Cajas, diferenciándose entre sí en 1%. En este caso, la comunidad San Francisco de Moras Pungo fue la que mejores resultados presento superando a las dos comunidades con 4%.

Ahora bien, el agroecosistema convencional obtuvo un rango de masa microbiana que varió de 365 a 508 $\mu\text{g C g}^{-1}$, en donde la mayor cantidad se registró en la comunidad de San Miguel de

Moras Pungo superando tanto a la comunidad Punku Wayku y San Francisco de Cajas en 12 y 39% respectivamente, siendo la comunidad San Francisco de Cajas la que menores resultados presento para este agroecosistema. Esto es consistente con investigaciones que han demostrado que los sistemas agrícolas convencionales, que dependen fuertemente de insumos químicos y fertilizantes sintéticos, tienden a tener una menor diversidad microbiana y una menor biomasa debido a la alteración del hábitat natural (Kremen y Miles, 2012).

Con respecto al agroecosistema degradado se observó un rango que fluctuó entre 334 y 417 $\mu\text{g C g}^{-1}$ entre las comunidades. En este caso, San Francisco de Cajas presentó los valores más bajos, mientras que San Miguel de Moras Pungo la superó en un 20% y Punku Wayku en un 24%. Siendo, esta última comunidad la mayor masa microbiana registro en su suelo.

Por último, en el agroecosistema natural registró valores que oscilaron entre 416 y 572 $\mu\text{g C g}^{-1}$, en las diferentes comunidades. En donde, la comunidad de San Francisco de Cajas obtuvo los valores más altos, superando a San Miguel de Moras Pungo en un 4% y a Punku Wayku en un 37%. Cabe destacar que Punku Wayku presentó la menor masa microbiana entre las comunidades evaluadas.

Por otro lado, el análisis de la masa microbiana indica que los agroecosistemas naturales y agroecológicos mantienen un nivel elevado de microorganismos, superando considerablemente a los sistemas convencionales y degradados. Estos resultados son consistentes con los reportados por Carvajal et al. (2024), quienes identificaron que los sistemas agroforestales tradicionales andinos incrementan la fertilidad del suelo a través de prácticas que promueven la biodiversidad biocultural y el reciclaje de nutrientes.

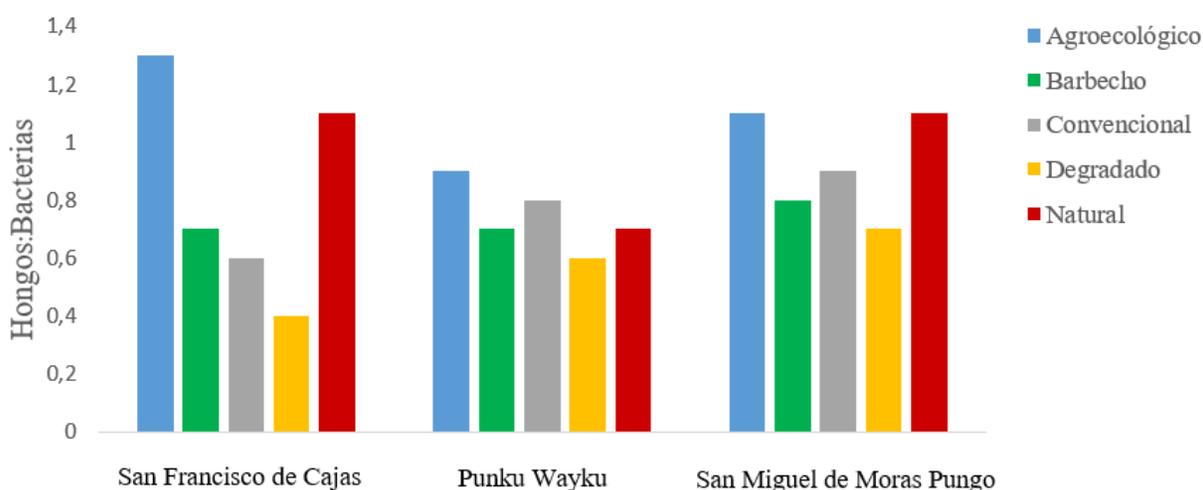
Finalmente, es importante destacar que las diferencias en los niveles de masa microbiana observadas entre las comunidades pueden estar influenciadas por factores ambientales como el tipo de suelo, el clima local y las prácticas agrícolas específicas implementadas en cada comunidad (Fierer y Jackson, 2006).

4.2.2 Proporción hongos/ bacterias

La relación entre hongos y bacterias en el suelo es un indicador clave de la salud del ecosistema, y los resultados obtenidos en las comunidades de San Francisco de Cajas, Punku Wayku y San Miguel de Moras Pungo, las comunidades reflejan variaciones significativas en esta proporción a través de diferentes tipos de manejo agroecológico. En general, los agroecosistemas natural y agroecológico mostraron una mayor proporción de hongos en comparación con las bacterias, lo que sugiere un equilibrio saludable en el microbiota del suelo.

Figura 31

Proporción entre hongos y bacterias presentes en diferentes localidades y tipos de manejo de suelo.



Los resultados proporcionados en la Figura 15, muestra la relación entre hongos y bacterias en el suelo, la cual se expresa como la cantidad de hongos presente por cada bacteria. En este sentido, en la comunidad de San Francisco de Cajas, el agroecosistema agroecológico presenta la mayor proporción entre hongo y bacterias, dato similar al encontrado en el agroecosistema natural que presenta 18% menos de lo encontrado en el agroecológico. Este hallazgo es consistente con estudios previos que indican que los sistemas agroecológicos tienden a promover una mayor diversidad microbiana debido a prácticas que favorecen la materia orgánica y la biodiversidad (Sain, 2022). En contraste, el agroecosistema degradado mostró la menor proporción, siendo superado por el agroecosistema convencional y el barbecho en un 16% y 75%, respectivamente. Esto resalta cómo las prácticas agrícolas intensivas pueden afectar negativamente la diversidad microbiana del suelo (Kremen y Miles, 2012).

Por otro lado, en la comunidad de Punku Wayku, las relaciones hongos-bacterias fueron más homogéneas. El agroecosistema agroecológico nuevamente presentó los valores más altos, seguido por el convencional, que tuvo un 12% menos. Este patrón sugiere que incluso dentro de un contexto más homogéneo, las prácticas sostenibles continúan favoreciendo una mayor biomasa fúngica (Cerrato y Alarcón, 2001). De manera similar, el agroecosistema convencional superó al de barbecho y al natural en un 14%, los cuales, a su vez, superaron al agroecosistema degradado con un 16%.

Adicionalmente, la comunidad de San Miguel de Moras Pungo presentó la mayor relación de hongos y bacterias en los agroecosistemas natural y agroecológico. Estos agroecosistemas muestran valores iguales, los cuales presentan 57% adicional a lo encontrado en el agroecosistema degradado. Este resultado es coherente con investigaciones que han utilizado el microBIOMETER para evaluar la salud del suelo, donde se ha demostrado que los suelos con mayor contenido orgánico tienden a tener una relación más alta entre hongos y bacterias (Nickens et al., 2023). Del mismo modo, el agroecosistema degradado es superado por el agroecosistema convencional en 28%; mismo que a su vez supera al barbecho en 12%.

Con respecto al agroecosistema agroecológico, se obtuvieron proporciones de hongos y bacterias que oscilaron entre 1.1:1 y 1.3:1. En donde, el que mejores resultados presentó fue la comunidad de San Francisco de Cajas superando a lo encontrado en San Miguel de Moras Pungo en 18%. En contraste, la comunidad de Punku Wayku fue la que menor proporción obtuvo, con 44% menos a lo reportado en San Francisco de cajas.

En cuanto al agroecosistema natural, se obtuvo proporciones que oscilaron en 0.7:1 y 1.1:1, siendo la comunidad de Punku Wayku la que menor proporción de hongos y bacterias reportó. Estos resultados refuerzan la idea de que diferentes prácticas agrícolas influyen directamente en la composición microbiana del suelo (Sharma et al., 2018). Adicionalmente, esta comunidad siendo inferior a lo reportado tanto en la comunidad de San Francisco de Cajas y San Miguel de Moras Pungo, las cuales reportaron proporciones iguales, superando a la comunidad de Punku Wayku en 57%.

Por otro lado, el agroecosistema Barbecho, obtuvo proporciones que oscilaron en 0.7:1 y 0.8:1. En donde, la comunidad Punku Wayku y San Francisco de Cajas que presentan la misma proporción

de hongos y bacterias son inferiores en 14% a lo reportado en la comunidad San Miguel de Moras Pungo que obtuvo los mejores resultados.

Con respecto al agroecosistema convencional, se reportaron proporciones que oscilaron en 0.6:1 y 0.9:1. Siendo la comunidad San Miguel de Moras Pungo la que la mayor proporción reporto superando a las comunidades Punku Wayku y San Francisco de Cajas en 12 y 50% respectivamente.

Por último, en el agroecosistema degradado, se obtuvieron rangos que fluctúan entre 0.4:1 y 0.7:1 en las tres comunidades, siendo la comunidad de San Miguel de Moras Pungo la que mayor proporción presento entre hongos-bacterias superando a la comunidad San Francisco de Cajas por 75%; mientras que el valor observado en la comunidad de Punku Wayku lo superó por 50%.

Los resultados obtenidos resaltan la importancia del manejo sostenible del suelo para fomentar un microbiota saludable. Estudios previos han demostrado que el uso del microBIOMETER es efectivo para evaluar las relaciones entre hongos y bacterias en suelos agrícolas (Sain, 2022). Esta herramienta permite realizar análisis rápidos y precisos, facilitando la identificación de prácticas que pueden mejorar la salud del suelo. Además, se ha observado que los suelos con una mayor relación de hongos a bacterias son más capaces de secuestrar carbono, lo cual es crucial para mitigar el cambio climático (Kremen y Miles, 2012). Por lo tanto, fomentar prácticas agrícolas que aumenten esta relación no solo beneficia la salud del suelo sino también contribuye a objetivos ambientales más amplios.

4.3. Análisis de correlación entre variables químicas y biológicas

La tabla presenta las correlaciones entre las variables descritas en metodología (Tabla 5), se identificaron que solo hubo correlación en entre estas variables; la actividad microbiana y las emisiones de CO₂. Adicionalmente se analizan las relaciones entre elementos como el calcio (Ca), magnesio (Mg), la materia orgánica (MO) y los microbios (µg C g⁻¹) como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Correlaciones entre variables químicas, biológicas y de emisiones de CO₂ en suelos agrícolas

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Ca	MO	15	0.84	0.00007
Ca	Microbios (µg C g ⁻¹)	15	0.53	0.04413
Ca	Solvita (mg C)	15	0.72	0.00238
Ca	KOH (mg C)	15	0.55	0.03451
Mg	MO	15	0.53	0.04013
Mg/K	Solvita (mg C)	15	0.56	0.02821
(Ca+Mg/K)	Solvita (mg C)	15	0.58	0.02252
Sumatoria de Bases	MO	15	0.77	0.00075
Sumatoria de Bases	Solvita (mg C)	15	0.62	0.01325
Sumatoria de Bases	KOH (mg C)	15	0.54	0.03853
MO	Microbios (µg C g ⁻¹)	15	0.67	0.00649
MO	Hongos/Bacterias	15	0.60	0.01727
MO	Solvita (mg C)	15	0.77	0.00074
MO	KOH (mg C)	15	0.78	0.00067
Microbios (µg C g ⁻¹)	Hongos/Bacterias	15	0.96	0.00000
Microbios (µg C g ⁻¹)	Solvita (mg C)	15	0.59	0.01989
Microbios (µg C g ⁻¹)	KOH (mg C)	15	0.57	0.02586

En la Tabla 6 se puede apreciar la correlación existente entre variables químicas y biológicas por los suelos agrícolas de estudio, se determinó las relaciones entre calcio (Ca) y otras variables, en primer lugar, se observa que el calcio (Ca) muestra una fuerte correlación positiva con la materia orgánica (MO) (Pearson = 0.84, p-valor = 0.00007). Esto sugiere que, a mayor presencia de calcio en el suelo, mayor es la cantidad de materia orgánica, y esta relación es estadísticamente significativa. Según Shabtai et al. (2023), el Ca facilita la formación de complejos órganos minerales que protegen la MO de la descomposición microbiana.

De manera similar, el calcio también tiene una moderada correlación positiva con los microbios ($\mu\text{g C g}^{-1}$) (Pearson = 0.53, p-valor = 0.04413), lo que indica que la presencia de calcio está relacionada con la actividad microbiana en el suelo. Esta correlación, aunque más débil, sigue siendo significativa. Shabtai et al. (2023) observaron que la adición de Ca altera la composición de la comunidad microbiana favoreciendo bacterias para la colonización de superficies minerales.

Asimismo, se encontró una correlación positiva moderada entre el calcio y la medición de CO_2 utilizando el método Solvita (Pearson = 0.72, p-valor = 0.00238) y una correlación positiva moderada con el método KOH (Pearson = 0.55, p-valor = 0.03451). Según Ramos y Zúñiga (2008), el calcio puede influir en la actividad microbiana del suelo, lo cual es fundamental para procesos como la mineralización del carbono. Este proceso puede incrementar las emisiones de CO_2 cuando hay un aumento en la disponibilidad de nutrientes debido a la adición de calcio al suelo. Estos resultados sugieren que el calcio podría influir en la actividad microbiana y en la respiración del suelo, medido por CO_2 , lo que podría tener implicaciones para la fertilidad y la dinámica del carbono en el suelo. Además, Adviento et al. (2007) argumentan que el manejo adecuado del calcio en suelos agrícolas no solo optimiza la salud del suelo, sino que también puede mitigar las emisiones asociadas a prácticas agrícolas intensivas.

De la misma manera, el magnesio (Mg) muestra una correlación moderada positiva con la materia orgánica (MO) (Pearson = 0.53, p-valor = 0.04013). Esto implica que el magnesio también está asociado con la cantidad de materia orgánica en el suelo. El Mg actúa como un catión puente que facilita la formación de complejos órgano minerales mejorando la agregación del suelo y la retención de carbono orgánico (Six et al., 2002). Este mecanismo explica cómo suelos ricos en Mg presentan mayores reservas de MO, permitiendo la actividad microbiana y la fertilidad del suelo.

En términos de la relación Mg/K, se observa que hay una correlación positiva moderada con la medición de CO_2 usando el método Solvita (Pearson = 0.56, p-valor = 0.02821), lo que indica que el balance de magnesio y potasio también puede influir en la actividad microbiana del suelo y en la liberación de CO_2 . Lal (2015) menciona la relación Mg/K puede alterar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, afectando de manera directa a la respiración microbiana.

Respecto entre la relación (Ca+Mg/K) y la medición de CO_2 (Solvita), se observa una correlación moderada positiva (Pearson = 0.58, p-valor = 0.02252). Esto sugiere que a medida que aumenta la relación entre calcio y magnesio, también aumenta la emisión de CO_2 , y esta relación es

estadísticamente significativa. Según Yao et al. (2022), la agregación del suelo puede ser influenciada por la presencia de cationes como Ca y Mg, afectando la respiración microbiana al modificar el hábitat disponible para los microorganismos. Esto sugiere que una mayor relación (Ca+Mg/K) podría mejorar la estructura del suelo, de esta manera aumentando la actividad microbiana y la emisión de CO₂.

De igual manera, las bases (K, Ca, Mg) muestran una correlación positiva fuerte con la materia orgánica (MO) (Pearson = 0.77, p-valor = 0.00075). Este hallazgo indica que, a mayor cantidad de bases en el suelo, mayor es la cantidad de materia orgánica, lo cual es estadísticamente significativo. Antonangelo et al. (2024) mencionan que la capacidad de intercambio catiónico (CIC), influenciada por la presencia de K, Ca y Mg, es esencial para la retención de nutrientes y la estructura del suelo, permitiendo la acumulación de MO. Esto refuerza la idea de que las bases pueden influir en la acumulación de materia orgánica en el suelo.

Asimismo, las bases también tienen una correlación moderada positiva con las emisiones de CO₂, tanto en el método Solvita (Pearson = 0.62, p-valor = 0.01325) como en el método KOH (Pearson = 0.54, p-valor = 0.03853). Esto es consistente con trabajos que sugieren que las bases pueden influir en la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, lo que a su vez modula su actividad y la liberación de CO₂ (Horn et al., 2021). Ambos resultados indican que el aumento en las bases en el suelo está relacionado con un incremento en la liberación de CO₂, y ambas correlaciones son estadísticamente significativas, esto sugiere que las bases en el suelo no solo influyen en la cantidad de materia orgánica, sino también en la actividad microbiana.

A continuación, la materia orgánica (MO), que es un componente clave en la actividad biológica del suelo, muestra una fuerte correlación positiva con los microbios ($\mu\text{g C g}^{-1}$) (Pearson = 0.67, p-valor = 0.00649). Verchot et al. (2011) demostraron que la MO derivada de la actividad microbiana actúa como agente estabilizador de carbono y favorece la formación de agregados, creando microhábitats que sustentan comunidades microbianas diversas. Esto indica que la materia orgánica en el suelo favorece la actividad microbiana. Además, la MO también muestra una correlación fuerte con la relación entre hongos y bacterias (Pearson = 0.60, p-valor = 0.01727), lo que sugiere que la cantidad de materia orgánica puede influir en la proporción de estos microorganismos en el suelo. Este resultado indica que suelos agrícolas saludables tienden a equilibrar la biomasa fúngica y bacteriana (F/B) (Zabala y Gómez, 2008).

De manera similar, la MO muestra una fuerte correlación tanto con Solvita (Pearson = 0.77, p-valor = 0.00074) como con KOH (Pearson = 0.78, p-valor = 0.00067), lo que significa que la materia orgánica podría estar asociada con un aumento en la liberación de CO₂, mediado por ambos métodos de medición. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de (Czaban et al., 2018), quienes reportaron un efecto positivo de la materia orgánica sobre la emisión de CO₂ debido a la mayor disponibilidad de carbono como fuente de energía para los microorganismos. De manera similar, Kruse et al. (2013) encontraron que a medida que aumenta el contenido de MO en suelos agrícolas, se incrementa la actividad respiratoria microbiana. Esto respalda la hipótesis de que la materia orgánica es un factor clave para la dinámica del carbono en los suelos. También coincide con los hallazgos de Kruse et al. (2013), quien señala que los suelos ricos en materia orgánica tienden a liberar mayores cantidades de CO₂ debido a la intensa actividad microbiana asociada a la descomposición de residuos orgánicos.

Por último, la relación entre los microbios ($\mu\text{g C g}^{-1}$) y los hongos/bacterias, se observa una correlación extremadamente fuerte (Pearson = 0.96, p-valor = 0.00000). Esto se alinea con estudios que destacan la importancia de la relación hongos/bacterias (H/B) en la salud del suelo. Una relación H/B equilibrada es crucial para el mantenimiento del equilibrio microbiológico en los agroecosistemas, ya que hongos y bacterias interactúan simbióticamente, beneficiándose mutuamente en la descomposición de materia orgánica y el ciclo de nutrientes (Cruz et al., 2021). De esta manera muestra que la actividad microbiana en el suelo está fuertemente relacionada con la proporción de hongos y bacterias, lo que refleja una dinámica microbiana bien establecida en el suelo. Además, los microbios también muestran una moderada correlación positiva con las mediciones de CO₂ usando Solvita (Pearson = 0.59, p-valor = 0.01989) y KOH (Pearson = 0.57, p-valor = 0.02586). Esto se alinea con estudios que indican que los microbios son responsables de una parte significativa de las emisiones de CO₂ del suelo, principalmente a través de la respiración heterótrofa, donde descomponen la materia orgánica y liberan CO₂ a la atmósfera (Vásquez y Macías, 2013), lo que sugiere que los microbios juegan un papel importante en la liberación de CO₂, mediada por ambos métodos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

5.1. Conclusiones

- La calibración del método de incubación utilizando hidróxido de potasio (KOH) en comparación con el método Solvita permitió establecer una correlación entre ambos métodos, evidenciada por un coeficiente de correlación de $r = 0.62$ en ambos casos. Esto muestra que el método KOH ofrece resultados comparables a Solvita en la medición de la respiración del suelo.
- Los análisis realizados mediante el método microBIOMETER mostraron que los agroecosistemas natural y agroecológico presentaron una mayor biomasa microbiana, con proporciones de hongos ligeramente superiores a las de bacterias. En el sistema natural se mostró una proporción de hongos: bacterias de 0.97:1 (49% hongos y 51% bacterias), mientras que el agroecológico alcanzó un promedio de 1.1:1 (52% hongos y 48% bacterias), lo que indica una comunidad microbiana más equilibrada y por ende más saludable. En contraste, el agroecosistema degradado presentó una proporción promedio de 0.57:1 (36% hongos y 64% bacterias), reflejando una comunidad dominada por bacterias que generalmente se asocia a suelos degradados y perturbados.
- El análisis de correlación evidenció que la tasa de respiración del suelo está significativamente influenciada por las variables químicas y biológicas. La materia orgánica mostró una alta correlación con Solvita ($r = 0.77$) y KOH ($r = 0.78$). De la misma manera, el calcio presentó asociaciones positivas ($R^2 = 0.72$ y 0.55) respectivamente, al igual que la sumatoria de bases ($r = 0.62$ y 0.54). Finalmente, la biomasa microbiana se relacionó con ambos métodos de respiración destacando la importancia de considerar conjuntamente indicadores biológicos y químicos para evaluar la funcionalidad de los suelos en los agroecosistemas.

5.2. Recomendaciones

- Se sugiere tratar de realizar una mayor cantidad de muestras en futuras investigaciones para validar con mayor precisión la eficacia del método KOH. Esto permitirá obtener resultados más representativos y confiables sobre la emisión de CO₂ en distintos suelos
- Realizar investigaciones futuras sobre el impacto a largo plazo de las prácticas convencionales y agroecológicas en la dinámica microbiana y de carbono, para generar datos adicionales que sirvan como base en la planificación de políticas agrícolas sostenibles en la región.
- Para evaluar la actividad microbiana y la calidad del suelo definir claramente los agroecosistemas, considerando tanto criterios biofísicos como socio productivos, clasificar los sistemas según el tipo de manejo (natural, agroecológico, convencional, barbecho, degradado), historial de uso, cobertura vegetal y condiciones ecológicas. Esta caracterización permite interpretar mejor los resultados y comparar entre contextos.
- Priorizar la restauración de los suelos degradados mediante estrategias como la aplicación de compost, biofertilizantes y la reforestación, lo que permitirá recuperar la calidad del suelo y mejorar la respiración microbiana.
- Fomentar programas de capacitación para agricultores locales, enfocados en el manejo sostenible del suelo, el impacto de las prácticas agrícolas en la calidad del suelo y el uso adecuado de metodologías para medir la respiración del suelo.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Adviento-Borbe, M. A. A., Haddix, M. L., Binder, D. L., Walters, D. T., & Dobermann, A. (2007). Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biology*, *13*(9), 1972-1988. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01421.x>
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. En *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes* (pp. 19-31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Agroecology: A brief account of its origins and currents of thought in Latin America. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *41*(3-4), 231-237. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1287147>
- Anastasiou, E., Lorentz, K. O., Stein, G. J., & Mitchell, P. D. (2014). Prehistoric schistosomiasis parasite found in the Middle East. *The Lancet Infectious Diseases*, *14*(7), 553-554. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(14\)70794-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(14)70794-7)
- Antonangelo, J. A., Culman, S., & Zhang, H. (2024). Comparative analysis and prediction of cation exchange capacity via summation: Influence of biochar type and nutrient ratios. *Frontiers in Soil Science*, *4*, 1371777. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1371777>
- Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, *515*(7528), 505-511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Bekku, Y., Koizumi, H., Oikawa, T., & Iwaki, H. (1997). Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, *5*(3), 247-254. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00131-X)

- Beltrán Pineda, M. E., Rocha Gil, Z. E., Bernal Figueroa, A. A., y Pita Morales, L. A. (2017). MICROORGANISMOS FUNCIONALES EN SUELOS CON Y SIN REVEGETALIZACIÓN EN EL MUNICIPIO DE VILLA DE LEYVA, BOYACÁ. *Colombia Forestal*, 20(2), 159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a05>
- Billings, S. A., Lichter, J., Ziegler, S. E., Hungate, B. A., & Richter, D. D. B. (2010). A call to investigate drivers of soil organic matter retention vs. Mineralization in a high CO₂ world. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(4), 665-668. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.002>
- Boiteau, G., Goyer, C., Rees, H. W., & Zebarth, B. J. (2014). Differentiation of potato ecosystems on the basis of relationships among physical, chemical and biological soil parameters. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(4), 463-476. <https://doi.org/10.4141/cjss2013-095>
- Brinton, W. F., & Vallotton, J. (2019). Basis for Comparisons of Soil CO₂ Respiration Test Procedures. *Agricultural & Environmental Letters*, 4(1), 180053. <https://doi.org/10.2134/ael2018.10.0053>
- Carbonell-Bojollo, R., González-Sánchez, E. J., Veróz-González, O., & Ordóñez-Fernández, R. (2011). Soil management systems and short term CO₂ emissions in a clayey soil in southern Spain. *Science of The Total Environment*, 409(15), 2929-2935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.003>
- Carvajal Benavides, J. G., Mugmal Farinango, Y. C., Rosales Enríquez, O. A., y Layana Bajaña, E. M. (2024). *Diseño del Sistema Agroforestal Tradicional Andino, respetando la diversidad biocultural, en la comunidad quichua de el manzanal, parroquia Caranqui, cantón Ibarra*. <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/1004>

- Castillo, A., Capa-Mora, E. D., Miguitama, P. G. Q., y Álvarez, L. S. J. (2020). *REPERCUSIÓN DEL SABER LOCAL EN EL MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO EN EL SUR DEL ECUADOR*. <https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v38n1/v38n1a17.pdf>
- Castro-Longoria, E. (2016). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 9(16), 128. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.16.56907>
- Cerrato, R. F., y Alarcón, Y. A. (2001). *La microbiología del suelo en la agricultura sostenible*. 8. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10402108>
- Chatterjee, A., & Acharya, U. (2018). Relationship among Different Soil Biochemical Methods to Determine Soil Health. *Open Journal of Soil Science*, 08(11), 303-313. <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.811022>
- Cruz-Cárdenas, C. I., Molina, L. X. Z., & Cancino, G. S. (2021). *Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: Consideraciones y retos*. 12. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v12n5/2007-0934-remexca-12-05-899.pdf>
- Czaban, W., Rasmussen, J., Laursen, B. B., Vidkjær, N. H., Sapkota, R., Nicolaisen, M., & Fomsgaard, I. S. (2018). Multiple effects of secondary metabolites on amino acid cycling in white clover rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 123, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.012>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)

- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C., y Mata, R. (2015). Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19543>
- Fernández, S. S., y Jusmet, J. R. (2010). *AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES DE CO₂: ALGUNOS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES*. 19.
- Fierer, N., & Jackson, R. B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(3), 626-631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507535103>
- Franco-Correa, M. (2009). *Utilización de los actinomicetos en procesos de biofertilización Use of actinomycetes in processes biofertilization*.
- Fu, M., Tian, L., Dong, G., Du, R., Zhou, P., & Wang, M. (2016). Modeling on Regional Atmosphere-Soil-Land Plant Carbon Cycle Dynamic System. *Sustainability*, 8(4), 303. <https://doi.org/10.3390/su8040303>
- Gaglio, M., Aschonitis, V. G., Mancuso, M. M., Reyes Puig, J. P., Moscoso, F., Castaldelli, G., & Fano, E. A. (2017). Changes in land use and ecosystem services in tropical forest areas: A case study in Andes mountains of Ecuador. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(1), 264-279. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1345980>
- Ghavamipour, S., Vafajoo, L., Pourhossein, G., Parthasarathy, P., y McKay, G. (2024). Post-combustion CO₂ capturing by KOH solution: An experimental and statistical optimization modeling study. *Energy & Environment*, 0958305X241230944. <https://doi.org/10.1177/0958305X241230944>

- Gordon, E. B. (2021). *Field of International Agriculture and Rural Development*.
<https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/5bbb44a2-b7c2-4510-87cc-37e5b26bcd84/content>
- Hancock, J. E., Bradley, K. L., Giardina, C. P., y Pregitzer, K. S. (2008). The influence of soil type and altered lignin biosynthesis on the growth and above and belowground biomass allocation of *Populus tremuloides*. *Plant and Soil*, 308(1-2), 239-253.
<https://doi.org/10.1007/s11104-008-9624-2>
- Haney, R. L., Brinton, W. F., y Evans, E. (2008). Soil CO₂ respiration: Comparison of chemical titration, CO₂ IRGA analysis and the Solvita gel system. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(2), 171-176. <https://doi.org/10.1017/S174217050800224X>
- Hanson, H. I., Smith, H. G., y Hedlund, K. (2015). Agricultural management reduces emergence of pollen beetle parasitoids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 9-14.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.001>
- Hill, G. B., Baldwin, S. A., & Vinnerås, B. (2013). Evaluation of Solvita compost stability and maturity tests for assessment of quality of end-products from mixed latrine style compost toilets. *Waste Management*, 33(7), 1602-1606.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.021>
- Horn, E. L., Cooledge, E. C., Jones, D. L., Hoyle, F. C., Brailsford, F. L., & Murphy, D. V. (2021). Addition of base cations increases microbial carbon use efficiency and biomass in acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 161, 108392.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108392>
- Hsieh, Y. P., Anderson, G. A., Miller, R. O., & Nemours, D. (2020). Non-instrumental Real-time Soil Respiration Rate and Soil Microbial Biomass Carbon Determinations.

- Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(19), 2479-2490.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1836205>
- Huang, Y.-H., Hung, C.-Y., Lin, I.-R., Kume, T., Menyailo, O. V., & Cheng, C.-H. (2017). Soil respiration patterns and rates at three Taiwanese forest plantations: Dependence on elevation, temperature, precipitation, and litterfall. *Botanical Studies*, 58(1), 49.
<https://doi.org/10.1186/s40529-017-0205-7>
- Ivashchenko, K., Ananyeva, N., Sushko, S., Paltseva, A., Seleznyova, A., Plushchikov, V., & Kudeyarov, V. (2020). Fungal and Bacterial Respiration in Urban Technosols vs. Natural Soils. En V. Vasenev, E. Dovletyarova, Z. Cheng, R. Valentini, & C. Calfapietra (Eds.), *Green Technologies and Infrastructure to Enhance Urban Ecosystem Services* (pp. 88-99). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16091-3_12
- Jia, J., De Goede, R., Li, Y., Zhang, J., Wang, G., Zhang, J., & Creamer, R. (2025). Unlocking soil health: Are microbial functional genes effective indicators? *Soil Biology and Biochemistry*, 204, 109768. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109768>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). *LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIAS DE SU USO EN LA AGRICULTURA*.
- Kremen, C., & Miles, A. (2012a). Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society*, 17(4), art40. <https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440>
- Kremen, C., & Miles, A. (2012b). Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society*, 17(4), art40. <https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440>

- Kruse, J., Simon, J., & Rennenberg, H. (2013). Soil Respiration and Soil Organic Matter Decomposition in Response to Climate Change. En *Developments in Environmental Science* (Vol. 13, pp. 131-149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098349-3.00007-4>
- Laine, M. B., Taipale, S. J., & Tirola, M. (2025). Comparison of methods for assessing fungi-to-bacteria ratio of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 61(5), 941-954. <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01911-7>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R. (2015). Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 329-339. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.6.329>
- Lavelle, P., Spain, A., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J. J., McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., & Zangerlé, A. (2016a). Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions. *Soil Science*, 181(3/4), 91-109. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000155>
- Lavelle, P., Spain, A., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J. J., McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., & Zangerlé, A. (2016b). Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions. *Soil Science*, 181(3/4), 91-109. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000155>
- León, J. D., González, M. I., y Gallardo, J. F. (2018). Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 1883-1894. <https://doi.org/10.15517/rbt.v59i4.33193>

- Marschner, P., & Rengel, Z. (2012). Nutrient Availability in Soils. En *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 315-330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00012-1>
- Montenegro-Gómez, S. P., Nieto-Gómez, L. E., y Giraldo-Díaz, R. (2022). Efecto de prácticas agroecológicas en la conservación del suelo de la Zona de Reserva Campesina de San Isidro, Pradera, Valle del Cauca. *Entramado*, 18(2). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.8002>
- Moore, D. B., Guillard, K., Morris, T. F., & Brinton, W. F. (2019). Correlation between Solvita Labile Amino-Nitrogen and CO₂ -Burst Soil Health Tests and Response to Organic Fertilizer in a Turfgrass Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2948-2959. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1689258>
- Moreno, J. A. C. (2016). *LOS HONGOS: HÉROES Y VILLANOS DE LA PROSPERIDAD HUMANA*. 17.
- Muñoz, E. A. G. (2022). *ESTIMACION DE LA TASA DE RESPIRACIÓN DEL SUELO UTILIZANDO DOS MÉTODOS*. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/items/d37cf606-4635-4276-9221-6556aecc8cb7>
- Murray, J., Keith, A., & Singh, B. (2015). The stability of low- and high-ash biochars in acidic soils of contrasting mineralogy. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.07.014>
- Negash, E., Getachew, T., Birhane, E., & Gebrewahed, H. (2020). Ecosystem Service Value Distribution Along the Agroecological Gradient in North-Central Ethiopia. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 107-116. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00149-7>

- Nickens, P., Ader, D., & Walker, F. (2023). *EVALUATING THE USEFULNESS AND ACCURACY OF THE SOIL MICROBIOMETER® AS A TOOL FOR EXTENSION AND RESEARCH IN RESOURCE-CONSTRAINED COUNTRIES*. <https://doi.org/10.33687/ijae.012.001.4899>
- Nyström, M., Norström, A. V., Blenckner, T., De La Torre-Castro, M., Eklöf, J. S., Folke, C., Österblom, H., Steneck, R. S., Thyresson, M., & Troell, M. (2012). Confronting Feedbacks of Degraded Marine Ecosystems. *Ecosystems*, *15*(5), 695-710. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9530-6>
- Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval-Solís, M. L., Linares-Fleites, G., y García-Calderón, N. E. (2012). DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA DE CARBONO EN SUELOS FORESTALES MEDIANTE UN MODELO DE RESERVORIOS. *AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA*, *3*.
- Palomo-Campesino, S., González, J., & García-Llorente, M. (2018). Exploring the Connections between Agroecological Practices and Ecosystem Services: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, *10*(12), 4339. <https://doi.org/10.3390/su10124339>
- Paolini Gomez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, *36*(1), 13. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>
- Prato, T. (2005). A fuzzy logic approach for evaluating ecosystem sustainability. *Ecological Modelling*, *187*(2-3), 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.035>

- Ramos, E., y Zúñiga, D. (2008). EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y PH DEL SUELO EN LA ACTIVIDAD MICROBIANA A NIVEL DE LABORATORIO. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 123. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.367>
- Rastegar, Z., & Ghaemi, A. (2022). CO2 absorption into potassium hydroxide aqueous solution: Experimental and modeling. *Heat and Mass Transfer*, 58(3), 365-381. <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03115-9>
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., & Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica), ahead*, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Sain, D. T. (2022). *Evaluation of microBIOMETER as a tool to estimate soil health in a west Tennessee cotton crop*. https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7810&context=utk_gradthes
- Sarandón, S. J. (2002). *El agroecosistema: Un sistema natural modificado*.
- Schnürer, J., Clarholm, M., & Rosswall, T. (1985). Microbial biomass and activity in an agricultural soil with different organic matter contents. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(5), 611-618. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90036-7)
- Shabtai, I. A., Wilhelm, R. C., Schweizer, S. A., Höschen, C., Buckley, D. H., & Lehmann, J. (2023). Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. *Nature Communications*, 14(1), 6609. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42291-6>
- Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C. S., Brar, A. S., Grover, K. K., Dia, M., & Steiner, R. L. (2018). The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture—A Review

- Paper. *American Journal of Plant Sciences*, 09(09), 1935-1951.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2018.99140>
- Sircely, J., & Naeem, S. (2013). Relationships of overstory trees and shrubs with forage species portray ecosystem service interactions in smallholder fallows. *Agroforestry Systems*, 87(2), 451-464. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9566-9>
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S. J., Gregorich, E. G., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981-1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., & Batten, K. M. (2006). Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Smirnova, N., Demyan, M. S., Rasche, F., Cadisch, G., & Müller, T. (2014). Calibration of CO₂ Trapping in Alkaline Solutions during Soil Incubation at Varying Temperatures Using a Respicond VI. *Open Journal of Soil Science*, 04(05), 161-167. <https://doi.org/10.4236/ojss.2014.45019>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789-813. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>

- Sundermeier, A., & Shedekar, V. (2019). *Solvita® CO₂ Respiration Soil Health Test*.
<https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2019-08/solvita-%C2%AE-co2-respiration-soil-health-test>
- Toledo, G., Gargaglione, V., Peri, P. L., y Toledo, S. (2020). Biomasa y respiración microbiana: Respuesta ante cambios en la humedad del suelo en la Estepa Magallánica Seca de Santa Cruz, Argentina. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 12(3), 151-165.
<https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n3.746>
- Tschumi, M., Albrecht, M., Bärtschi, C., Collatz, J., Entling, M. H., & Jacot, K. (2016). Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.001>
- Vásquez, J. R., y Macías, F. (2013). *RESPIRACIÓN DEL SUELO SEGÚN SU USO Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS FORMAS DE CARBONO EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, COLOMBIA*. <https://ve.scielo.org/pdf/ba/v25n3/art04.pdf>
- Verchot, L. V., Dutaur, L., Shepherd, K. D., & Albrecht, A. (2011). Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. *Geoderma*, 161(3-4), 182-193.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.017>
- Yan, Z., Liu, C., Todd-Brown, K. E., Liu, Y., Bond-Lamberty, B., & Bailey, V. L. (2016). Pore-scale investigation on the response of heterotrophic respiration to moisture conditions in heterogeneous soils. *Biogeochemistry*, 131(1-2), 121-134. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0270-0>

- Yang, C., Liu, N., & Zhang, Y. (2019). Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. *Geoderma*, 337, 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>
- Yao, Y., Chen, J., Li, F., Sun, M., Yang, X., Wang, G., Ma, J., & Sun, W. (2022). Exchangeable Ca²⁺ content and soil aggregate stability control the soil organic carbon content in degraded Horqin grassland. *Ecological Indicators*, 134, 108507. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108507>
- Zabala, M., y Gómez, Y. (2008). Biomasa fúngica y bacteriana como indicadoras del secuestro de C en suelos de sabanas sustituidos por pinares en Uverito, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 58(2). <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i2.5258>

ANEXOS

Anexo 1. Participación en el IV Seminario Científico Internacional CONCIENCIA: "Cambio Climático, Sustentabilidad y Seguridad Alimentaria"

