



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE BIOLOGIA

Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade

**REHABILITACAO DA BIODIVERSIDADE E FUNCOES
ECOLÓGICAS DOS SOLOS EM AGROECOSISTEMAS ALTO-
ANDINOS DO EQUADOR SOBRE CANGAHUA**

VICENTE PARRA

2025

VICENTE PARRA

**REHABILITACAO DA BIODIVERSIDADE E FUNCOES
ECOLÓGICAS DOS SOLOS EM AGROECOSISTEMAS ALTO-
ANDINOS DO EQUADOR SOBRE CANGAHUA.**

“Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências para
obtenção do título de Doutor em Ecologia,
Conservação e Biodiversidade”.

Orientador:

Prof. Dr. Heraldo L. de Vasconcelos

Uberlândia

Setembro— 2025

VICENTE PARRA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P259r
2025 Parra, Vicente, 1981-
Reabilitação da biodiversidade e funções ecológicas dos solos em agroecossistemas Alto-Andinos do Equador sobre Cangahua [recurso eletrônico] / Vicente Parra. - 2025.

Orientador: Heraldo Luis de Vasconcelos.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.5072>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Ecologia. 2. Solos - Degradação. 3. Biodiversidade. 4. Ecologia agrícola. I. Vasconcelos, Heraldo Luis de, 1962-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade. III. Título.

CDU: 574

Rejane Maria da Silva
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/1925

REHABILITACAO DA BIODIVERSIDADE E FUNCOES ECOLÓGICAS DOS SOLOS EM AGROECOSISTEMAS ALTO- ANDINOS DO EQUADOR SOBRE CANGAHUA

“Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências para
obtenção do título de Doutor em Ecologia,
Conservação e Biodiversidade”.

Aprovada em:

Prof. Dr. Stephen Sherwood
Wageningen University, Netherlands

Prof. Dr. Diego dos Santos
Universidade Federal da Fronteira Sul

Prof. Dr. Ana Silvia Franco Pinheiro Moreira
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Adão de Siqueira Ferreira
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Heraldo Luis de Vasconcelos
Universidade Federal de Uberlândia
(Orientador)

UBERLÂNDIA

Setembro-2025



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Ecologia, Conservação e Biodiversidade				
Defesa de:	Tese, número 105, PPGEGB				
Data:	vinte e nove de agosto de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	13:15	Hora de encerramento:	18:10
Matrícula do Discente:	12123ECR001				
Nome do Discente:	Vicente Javier Parra León				
Título do Trabalho:	Reabilitação da biodiversidade e funções ecológicas dos solos em agroecossistemas alto-andinos do Equador sobre Cangahua				
Área de concentração:	Ecologia				
Linha de pesquisa:	Ecologia aplicada e conservação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Interações herbívoro-planta e seus impactos sobre a estrutura e dinâmica da vegetação do Cerrado: subsídios para recomposição de ambientes alterados				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade assim composta pelos doutores: Ana Silvia Franco Pinheiro Moreira - INBIO/UFU; Stephen Garrett Sherwood - Wageningen University; Diego dos Santos - UFFS; Adão de Siqueira Ferreira - ICIAG/UFU e Heraldo Luis de Vasconcelos - INBIO/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Heraldo Luis de Vasconcelos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Silvia Franco Pinheiro Moreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2025, às 18:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Heraldo Luis de Vasconcelos, Presidente**, em 29/09/2025, às 18:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adão de Siqueira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/09/2025, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego dos Santos, Usuário Externo**, em 30/09/2025, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Stephen Garrett Sherwood, Usuário Externo**, em 01/10/2025, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6657203** e o código CRC **C26C5C70**.

Dedicatoria

A las montañas de los Andes, por convertirse en la columna vertebral de mi vida, mi inspiración, motivación y guía.

A mis padres y hermanas por estar siempre presentes en mi vida, a Violeta para que se inspire en las montañas, sus agroecosistemas y su gente.

A Priscila, mi compañera de vida, por el caminar de todos los días.

Agradecimientos

Al programa de Posgraduación en Ecología, Conservación y Biodiversidad por permitirme ser parte de su formación, por recibir bases teóricas sólidas en mis estudios de doctorado.

Agradecimiento especial al profesor Herald Vasconcelos por el soporte en la investigación, por sus acertadas revisiones en todo el proceso de análisis y por convertirse en mi referente académico.

A los miembros de la Banca examinadora por sus aportes en este trabajo.

A la fundación EKORURAL y al IDRC por el apoyo metodológico y financiero.

A los docente y estudiantes del Centro de Bioconocimiento- ESPOCH, por el apoyo en campo y laboratorio.

A los agricultores por su resiliencia y mantener vivas sus prácticas en los agroecosistemas.

ÍNDICE

Resumen General	10
Abstract	11
Introducción general	13
CAPITULO I	24
Caracterización de los manejos agroecológico y tradicional en agroecosistemas altoandinos degradados de Cacha-Chimborazo y La Merced-Pichincha-Ecuador	24
Resumen	25
Introducción	28
Materiales y métodos	30
<i>Área de estudio</i>	30
<i>Diseño del estudio</i>	31
<i>Metodología</i>	31
<i>Análisis estadístico</i>	32
Resultados	33
<i>Caracterización de las prácticas de manejo de los agroecosistemas de Cacha</i>	33
<i>Caracterización de las prácticas de manejo de los agroecosistemas de la Merced</i>	37
<i>Relación entre las propiedades químicas y los tipos de manejo</i>	44
<i>Caracterización de las prácticas de manejo en los agroecosistemas de la Merced y Cacha</i>	46
<i>Relación entre las propiedades químicas y los tipos de manejo</i>	48
Conclusiones e implicaciones	50
CAPITULO II	52
Influencia de las prácticas de manejo de suelo en la biodiversidad edáfica en agroecosistemas altoandinos	52
Resumen	53
Abstract	54
Introducción	56
Materiales y métodos	58
<i>Área de estudio</i>	58
<i>Diseño del estudio</i>	59
Metodología	64
<i>Evaluación de la macrofauna (lombrices)</i>	64
<i>Evaluación de los artrópodos del suelo</i>	65
<i>Cuantificación de la microbiomasa bacterial</i>	65

Análisis estadístico	66
Resultados.....	67
<i>Evaluación de la macrofauna (lombrices) en diferentes tipos de manejo.....</i>	<i>67</i>
<i>Evaluación de los artrópodos en diferentes tipos de manejo.....</i>	<i>68</i>
Evaluación de la microbiomasa de hongos y bacterias en diferentes tipos de manejo.....	72
Discusión	74
Evaluación de la macrofauna (lombrices) en diferentes tipos de manejo y ecosistemas.....	75
<i>Evaluación de los artrópodos en diferentes tipos de manejo y ecosistemas.</i>	<i>76</i>
<i>Evaluación de la microbiomasa de hongos y bacterias en diferentes tipos de manejo.</i>	<i>78</i>
Conclusiones e implicaciones.	79
CAPITULO III.....	82
Influencia del manejo de suelo en la descomposición de la materia orgánica, contenido de carbono y respiración de suelos degradados con cangahua en agroecosistemas altoandinos.	82
Resumen.....	83
Introducción	85
Materiales y métodos	87
Área de estudio	87
Diseño del estudio	88
Velocidad de descomposición de la materia orgánica.	89
Contenido de Carbono del Suelo	91
Respiración del Suelo	91
Análisis estadístico	92
Resultados.....	93
Tasa de descomposición de la materia orgánica.....	93
Contenido de Carbono del Suelo	95
Respiración del Suelo	96
Discusión	97
Tasa de descomposición de la materia orgánica.....	97
Contenido de Carbono del Suelo	99
Respiración del Suelo	100
Conclusiones e implicaciones.	100
Conclusiones generales.....	102
Referencias bibliográficas	103
Anexos	113

Resumen General

La sostenibilidad de los agroecosistemas altoandinos depende de la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS), la actividad microbiana y el mantenimiento de las funciones ecológicas, particularmente en suelos con cangahua, un material volcánico endurecido altamente susceptible a la degradación. Este estudio integró los efectos de diversas prácticas de manejo del suelo agroecológico, tradicional, barbecho y ecosistema degradado como control sobre la descomposición de la materia orgánica, contenido de carbono, respiración, diversidad microbiana y funcionalidad biogeoquímica en dos localidades de la Sierra ecuatoriana: Cacha (Chimborazo) y La Merced (Pichincha), con contrastes históricos de rehabilitación (5 frente a 15 años, respectivamente). La metodología combinó el índice de bolsas de té (green y rooibos) para estimar tasas de descomposición de materiales lábiles y recalcitrantes, determinación de COS por pérdida por ignición, medición de la respiración con el método Solvita®, se evaluaron también indicadores microbiológicos (microbiomasa, relación hongo/bacteria) y faunísticos (abundancia de lombrices y artrópodos), mediante muestreos realizados en parcelas con al menos cinco años de intervención en Cacha y quince en La Merced, complementados con análisis estadísticos multivariados (PCA y PERMANOVA). Se empleó un diseño de muestreo factorial completo con 24 unidades para la toma de muestras, lo que permitió evaluar efectos de manejo, sitio e interacción. Los resultados mostraron que el manejo agroecológico potenció consistentemente la descomposición de té verde y la acumulación de COS en comparación con los manejos tradicional, barbecho y degradado, observándose además que La Merced presentó tasas generalmente superiores a Cacha, reflejando tanto diferencias climáticas como históricas de manejo. En general los tres manejos presentaron resultados diferentes del ecosistema degradado (control) que evidenció una marcada pérdida de actividad microbiana, bajo contenido de COS y disminución de la funcionalidad biogeoquímica, confirmando el colapso funcional en suelos con cangahua expuesta. Los análisis microbianos revelaron que los suelos agroecológicos presentaron mayor riqueza taxonómica, lo que se explica en parte por el barbecho activo incorporado en este sistema, que mantiene altos niveles de biodiversidad edáfica. Para bacterias y hongos, todos los manejos mostraron valores semejantes, aunque superiores al ecosistema degradado, sin interacción entre zonas y manejo, favoreciendo la eficiencia en el ciclo de nutrientes y la resiliencia frente a perturbaciones. Además, se encontraron correlaciones positivas significativas entre COS, biomasa microbiana y respiración del suelo, indicando que la incorporación sostenida de materia orgánica, la cobertura permanente y la diversificación de cultivos mejoran directamente la capacidad funcional y la estabilización del carbono. La integración de estos hallazgos evidencia que la implementación sistemática de prácticas no solo rehabilitan los suelos degradados, sino que también contribuyen al secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático en paisajes montañosos frágiles. De manera importante, el análisis comparativo entre sitios y contextos

históricos resalta la dimensión temporal de la restauración del suelo, enfatizando que la implementación a largo plazo es crítica para alcanzar los beneficios ecosistémicos plenos. En conclusión, esta evaluación integradora proporciona evidencia científica sólida que respalda la importancia de integrar prácticas con principios ecológicos con técnicas tradicionales como una estrategia clave para (re)habilitar los suelos altoandinos con cangahua, incrementando la diversidad y actividad microbiana y sus funciones ecológicas en el suelo, logrando tanto la restauración ambiental como la resiliencia socioeconómica en territorios altoandinos altamente vulnerables.

Palabras clave: Carbono orgánico del suelo, manejo agroecológico, suelos con cangahua, agroecosistemas altoandinos, actividad microbiana, diversidad edáfica

Abstract

The sustainable management of high-Andean agroecosystems relies heavily on the dynamics of soil organic carbon (SOC), microbial activity, and the maintenance of ecosystem services, particularly in soils with cangahua, a hardened volcanic material highly prone to degradation. This study synthesized the effects of diverse soil management practices—agroecological, traditional, fallow, and degraded ecosystem as control—on organic matter decomposition, carbon content, soil respiration, microbial diversity, and biogeochemical functionality across two Ecuadorian highland sites, Cacha (Chimborazo) and La Merced (Pichincha), which differ in their historical rehabilitation periods (5 versus 15 years, respectively). The methodology integrated tea bag indices (green and rooibos) to evaluate decomposition rates of labile and recalcitrant organic materials, loss-on-ignition for SOC quantification, Solvita® assays for soil respiration, and microbial community assessments through taxonomic and functional diversity metrics. Statistical analyses employed a fully factorial design with 24 experimental units, enabling detection of management, site, and interaction effects. Results consistently demonstrated that agroecological management enhanced green and rooibos tea decomposition, SOC accumulation, and soil respiration relative to traditional, fallow, and degraded systems, with La Merced exhibiting generally higher rates than Cacha, reflecting both climatic and historical management influences. Traditional and fallow practices provided intermediate benefits, insufficient to counteract long-term degradation, whereas degraded ecosystems exhibited severely reduced microbial activity, low SOC content, and diminished biogeochemical functionality, confirming functional collapse under cangahua exposure. Microbial analyses revealed that agroecological soils harbored greater taxonomic richness and functional redundancy, supporting higher nutrient cycling efficiency and resilience to

perturbations. Moreover, the study found strong positive correlations between SOC content, microbial biomass, and respiration rates, indicating that sustained organic inputs, permanent ground cover, and crop diversification directly enhance soil functional capacity and carbon stabilization. Integrating these findings, the research demonstrates that systematic agroecological interventions not only rehabilitate degraded soils but also contribute to carbon sequestration and climate change mitigation in fragile mountainous landscapes. Importantly, the comparative analysis across sites and historical contexts highlights the temporal dimension of soil restoration, emphasizing that long-term implementation is critical to realizing full ecosystem benefits. In conclusion, this integrative assessment provides robust scientific evidence supporting agroecological transitions as a key strategy to restore high-Andean cangahua soils, improve soil fertility and structure, enhance microbial diversity and activity, maintain ecosystem services, and strengthen the capacity of rural communities to sustain agricultural production while contributing to global climate mitigation goals. The findings inform policy formulation, extension services, and participatory management approaches, underscoring the value of combining ecological principles with traditional practices to achieve both environmental restoration and socio-economic resilience in highly vulnerable highland territories.

Keywords: Soil organic carbon, agroecological management, soils with cangahua, high Andean agroecosystems, microbial activity.

Introducción general

Los ecosistemas de los países de América del Sur, América Central y México están estrechamente relacionados con la influencia de los volcanes, es así que la cuarta parte de éstos países tienen suelos originarios de material piroclástico (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997; Podwojewski, Janeau y Leroux 2008). En consecuencia, en gran parte de la Sierra Central y Norte del Ecuador existe un material endurecido procedente de erupciones de hace miles de años presente naturalmente bajo el suelo (cangahua en profundidad), pero la degradación antrópica lo ha dejado en la superficie (cangahua aflorante). Localmente, este material se conoce como "cangahua", que en la lengua nativa significa "tierra dura"(Jiménez, Loayza y Metzler 2018).

La cangahua (aflorante y en profundidad) se encuentra en la región andina del Ecuador, desde el Sur de la provincia de Chimborazo hasta el Carchi, en un área aproximada de 270 000 ha (15 % de total de suelo cultivable de la Sierra) entre los 2200 y 3500 msnm. Se estima que la cangahua que ha aflorado luego de que el suelo superficial se ha degradado es de 83 000 ha, es decir, 30 % del total de este material endurecido (Podwojewski y Germain 2005; Hidrobo et al. 2015; INEC 2016), como se lo puede observar en la Figura 1.

Este material endurecido se presenta como una capa estéril que proviene de antiguas rocas piroclásticas, edafológicamente corresponde al horizonte C y se origina a partir de tobas no consolidadas pero desecadas o depósitos piroclásticos (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997). Los propios afloramientos de cangahua constituyen un característico paisaje erosionado: son muy regulares, casi desprovistos de vegetación, con pendientes alternas que cubren las capas subyacentes como si fueran losas de cemento (Orejuela, Huera y Villacrés 2018).

En los Andes ecuatorianos, los suelos derivados de cenizas volcánicas han desempeñado un papel fundamental en la agricultura de regiones andinas como el Ecuador. Entre ellos, la *cangahua* — una formación edáfica endurecida de origen volcánico— representa un desafío y una oportunidad para el desarrollo agrícola sostenible. Este horizonte edáfico, caracterizado por su alta densidad aparente, baja porosidad y escasa permeabilidad, ha sido históricamente considerado una limitante para el uso agropecuario debido a su resistencia a la penetración radicular y al movimiento del agua (Podwojewski & Germain, 2005; Zebrowski et al., 1997).

El proceso de rehabilitación hacia un suelo fértil inicia con la fragmentación de esa capa física, seguido de la incorporación de materia orgánica, la restauración de comunidades biológicas

edáficas y la recuperación de la estructura y porosidad del suelo, lo que permite mejorar la capacidad de retención de nutrientes y agua. Estudios recientes muestran que la adición de enmiendas orgánicas, cobertura vegetal estable y prácticas de manejo con baja perturbación producen aumentos sustanciales en carbono orgánico, nitrógeno, estabilidad de agregados y otras métricas de salud del suelo (Kimmell et al., 2023; USDA-Forest Service, 2000). Este proceso de descompactación y acondicionamiento físico-químico permite la colonización por raíces, microorganismos y fauna edáfica, lo que favorece la formación de estructuras más estables y la mejora de la fertilidad del suelo (Podwojewski et al., 2008; Hidrobo et al., 2015).

Durante los primeros tres años, la intervención inicial se centra en romper la capa endurecida mediante labranza profunda con maquinaria especializada, como arados de cincel o subsoladores. Esta etapa es crítica para permitir la infiltración de agua y el desarrollo radicular. A la par, se incorpora materia orgánica —como estiércol, compost o abonos verdes— que mejora la estructura del suelo y estimula la actividad biológica (Podwojewski et al., 2008; Hidrobo et al., 2015).

Entre los años tres y siete, el suelo entra en una fase de estabilización y colonización. Se establecen cultivos de cobertura y rotaciones con leguminosas, lo que favorece la formación de agregados estables y la recuperación progresiva de la fertilidad. En este periodo, se incrementa la actividad microbiana y la presencia de fauna edáfica, elementos clave para la funcionalidad ecológica del suelo (Orejuela et al., 2018; Lal, 2015). La mejora en la infiltración, la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico son indicadores de que el suelo comienza a comportarse como un sistema agrícola incipiente.

A partir del séptimo año, y hasta aproximadamente el año quince, se consolida el uso agrícola del suelo transformado. En esta etapa, se han reportado rendimientos aceptables en cultivos como papa, maíz y cebada, aunque el manejo debe mantenerse constante para evitar la recompactación y conservar la estructura lograda (Hidrobo et al., 2015). La cangahua transformada adquiere características físicas y químicas más cercanas a las de un suelo agrícola convencional, aunque su resiliencia frente a perturbaciones sigue siendo limitada.

La duración total del proceso puede variar entre cinco y quince años, dependiendo de factores como la profundidad y dureza del horizonte cangahua, las condiciones climáticas locales, la disponibilidad de maquinaria e insumos, y el nivel de capacitación técnica de los agricultores.

Comprender esta temporalidad es esencial para diseñar estrategias de manejo que promuevan la productividad sin comprometer la sostenibilidad ecológica del ecosistema.

La conversión de la cangahua en suelo agrícola no solo implica un cambio funcional, sino que también plantea importantes interrogantes sobre la sostenibilidad de estos sistemas. La remoción de capas endurecidas puede alterar el equilibrio hidrológico, aumentar la susceptibilidad a la erosión y comprometer la capacidad de almacenamiento de carbono del suelo (Lal, 2015; Cotrufo et al., 2013). Por tanto, comprender los procesos ecológicos y físicos involucrados en esta transformación es esencial para diseñar estrategias de manejo que promuevan la productividad sin comprometer la integridad ecológica del ecosistema.

En ese sentido, la cangahua es baja en nutrientes y materia orgánica, además altamente compactada. Sin embargo, la población local acondiciona este subsuelo endurecido para la agricultura generalmente con prácticas insostenibles, con la consecuente degradación del mismo, ocasionando otros problemas socio-ecológicos como la migración y expansión de la frontera agrícola hacia ecosistemas sumamente frágiles como el páramo (Podwojewski y Germain 2005).

A esta problemática se debe agregar que la degradación edáfica en la últimas décadas ha liberado grandes cantidades de Carbono a la atmosfera en forma de CO₂ o CH₄ principales gases de efecto invernadero (GEI) y causantes del cambio climático (FAO 2020; Bossio et al. 2020). Los suelos cultivados del mundo han perdido del 25 al 75 % de sus reservas originales de carbono orgánico del Suelo (COS) (un suelo saludable contiene más COS que la atmósfera y la vegetación juntas), convirtiendo al suelo en uno de los recursos más vulnerables frente al cambio climático. Pero también y en sentido más amplio, al ser parte de un sistema socioecológico, la degradación del suelo afecta a la calidad de vida y la economía de aquellos que hacen uso de este recurso, que generalmente son las poblaciones más deprimidas (FAO 2017).

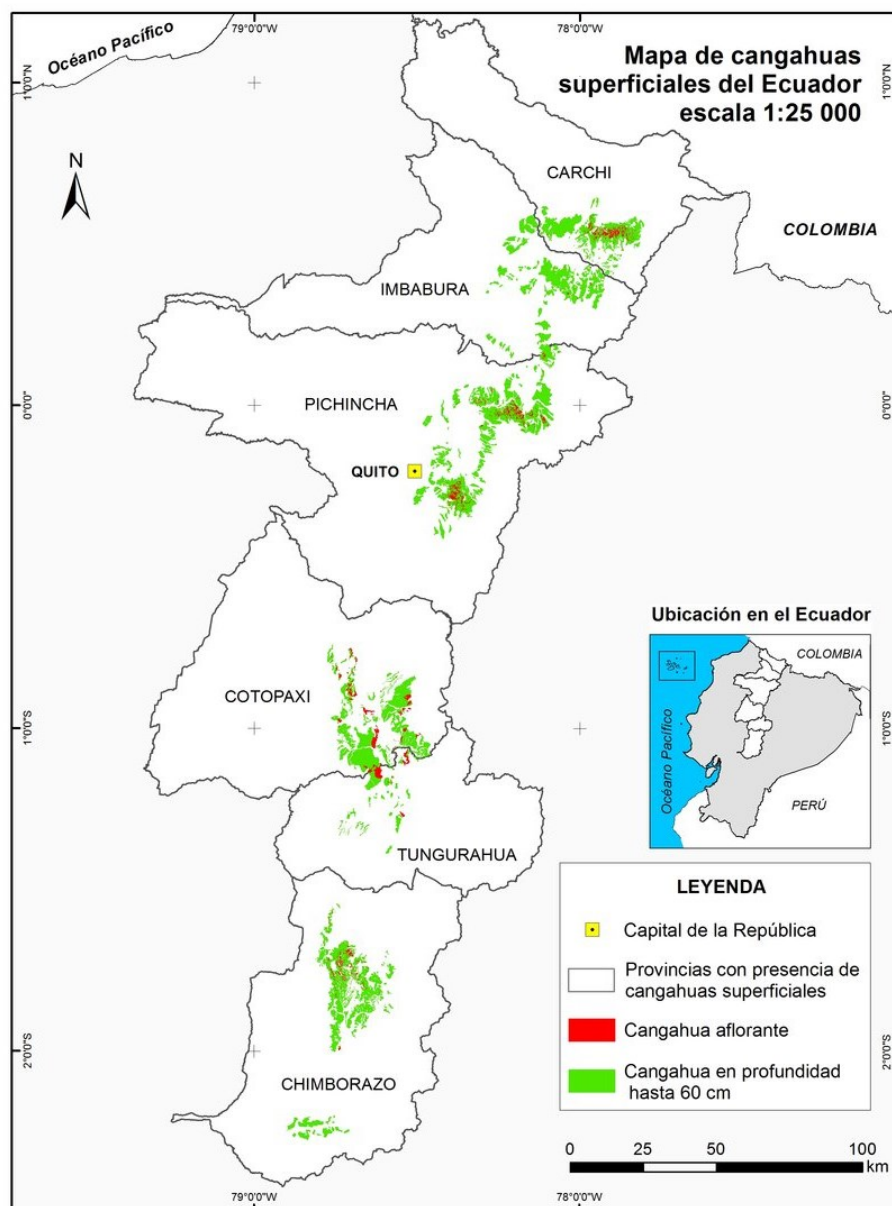


Figura 1: Distribución de suelos con cangahuas superficiales y en profundidad hasta 60 cm en el Ecuador

Fuente: Jiménez et al., 2018.

Sin embargo, los suelos agrícolas y materiales endurecidos como la cangahua tienen el potencial para secuestrar COS mediante prácticas agroecológicas, devolviendo al suelo las funciones ecológicas y su fertilidad al ser el COS un componente estructural de la materia orgánica. Al respecto conviene decir que, el carbono es un indicador de la salud del suelo y clave para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS). Es decir, mediante prácticas agroecológicas es

posible recarbonizar el suelo, contribuir a la mitigación del cambio climático, mejorar la fertilidad del suelo, reducir el avance de la frontera agrícola y aumentar la retención de agua en la “esponja de carbono” formada por detritos minerales y orgánicos (FAO 2020; Tunstall y Jehne 2005; Jehne 2017).

Por esta razón y considerando que, una tercera parte de los suelos agrícolas del mundo están degradados, existe un potencial técnico de recarbonizarlos. Evidencias científicas sobre esta temática fueron presentadas por más de 450 investigadores de 111 países en el Simposio Mundial del Carbono Orgánico del Suelo celebrado en Roma en el 2017 (FAO 2020; 2017). Por consiguiente, es posible rehabilitar este material estéril para convertirlo en suelo vivo y productivo según estudios realizados en México, Centro América y el Ecuador (Hidrobo et al. 2015; Bellosi y Cantil 2012; Podwojewski y Germain 2005; Jiménez, Loayza y Metzler 2018) y además contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de COS .

De la misma forma, estudios de campo han demostrado que mediante prácticas agroecológicas es posible incrementar la concentración de carbono, la biodiversidad y mejorar la población de las comunidades microbianas asociadas con el aumento de la proporción de hongos y bacterias. Estas investigaciones comprobaron que es posible secuestrar cerca de 10 toneladas métricas de carbono/ha en un año, aumentando además la disponibilidad de nutrientes del suelo, siendo un mecanismo rentable de secuestro de carbono y de mejoramiento de la fertilidad del suelo sostenible a largo plazo (Jonhson, Ellington y Eaton 2019; Field et al. 2019).

En lo que se refiere a la caracterización, génesis, cartografía, problemática socioeconómica y posibilidades de rehabilitación mediante prácticas de manejo de éste material volcánico endurecido se realizaron estudios en las décadas de los 80-90 (Noni 1993; Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997), es así que en el Ecuador se desarrolló el III Simposio Internacional de Suelos Endurecidos (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997). Posteriormente, se han realizado mapeos satelitales y estudios sobre la rehabilitación mediante prácticas sustentables puntuales y análisis del mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. Sin embargo, no se ha realizado estudios considerando la interacción y complejidad de prácticas de manejo de los agroecosistemas altoandinos y tampoco se ha cuantificado la biota y relación del COS en todos en los procesos de rehabilitación de suelos degradados. Para estandarizar la comprensión y redacción, vamos a definir varios términos que se utilizarán en el presente texto.

Manejo de suelos

Conjunto de prácticas que buscan satisfacer las necesidades básicas de las plantas. El manejo sustentable de un suelo implica la conservación de la estructura y estabilidad de los agregados para que circulen: el aire, el agua y los nutrientes, la humedad y el material parental que originó el suelo (Castro López 2017; Nicholls et al. 2015). Para alcanzar sostenibilidad de los suelos se requiere que las pérdidas de nutrientes en el sistema, se reduzcan al mínimo, favoreciendo y fortaleciendo mecanismos que permitan el reciclaje de nutrientes dentro del sistema (Gliessman et al. 2007).

Manejo Barbecho

El término barbecho hace referencia al período de descanso del suelo entre cosechas, asociado a la regeneración del suelo en preparación para la siembra, por lo que no se percibe como un momento pasivo, sino un momento imprescindible para la siguiente etapa de refuerzo activo de la cosecha (Licona y Estupiñán 2019).

Durante éste período (6 meses para las unides de estudio), los nutrientes son almacenados en la biomasa de la vegetación sucesional y luego liberados para el nuevo ciclo de siembras (Licona y Estupiñán 2019; Börner et al. 2007). Es una condición de suelo que se encuentra temporalmente sin cultivos, pero no completamente abandonada y sin cultivar, en varios lugares inclusive se lo cubre con una capa de materia orgánica que es generalmente residuos de la cosecha anterior o transportados de terrenos cercanos, eventualmente esta biomasa se la humedece para favorecer la descomposición (Barrios et al. 2005), como se los observa en la Imagen 1.



Imagen 1. Manejo barbecho en la localidad la Merced donde se observa la materia orgánica acumulada sobre el suelo.

Manejo tradicional

Son sistemas de producción agrícola para la obtención de alimentos, desarrollados sobre la base de conocimientos y prácticas empíricas que han sido adquiridos y enriquecidos por generaciones. Estos sistemas de producción nos brindan una base de conocimientos que podemos aplicar y revalorizar para mejorar los sistemas agrícolas modernos y volverlos más resilientes (Méndez et al. 2017; Altieri et al. 2015).

Así, en las zonas altas de los Andes tradicionalmente se cultivan tubérculos y granos andinos y en las zonas bajas e interandinas maíz *Zea mays* y fréjol *Phaseolus vulgaris* (Hofstede 2023). En consecuencia, para la presente investigación se ha considerado el cultivo del maíz en asociación o rotación con alguna leguminosa (fréjol) como manejo tradicional por encontrarse en más del 30 % del territorio en las dos zonas de estudio.



Imagen 2. Manejo tradicional en la localidad La Merced, cultivo de maíz.

Manejo agroecológico. Este tipo de manejo mantiene y mejora el equilibrio ecológico de los sistemas de producción (Gómez, Ríos-Osorio y Eschenhagen 2015). La Agroecología estudia los sistemas agrícolas utilizando la teoría ecológica para maximizar y aumentar los rendimientos y conservar los recursos naturales (Nicholls et al. 2015; Gliessman 2006)

Integra principios biológicos y ecológicos para la conservación y restauración del suelo, agua y biodiversidad así, respeta los ciclos de energía y materiales, mejora la calidad del suelo mediante la incorporación de materia orgánica para el incremento de la actividad biológica del suelo, diversifica las especies en el agroecosistema para mejorar las interacciones biológicas y sinergias y promueve el dialogo de saberes de los diferentes sistemas de conocimiento, evitando la

dependencia de monocultivos o productos y de subsidios externos, impulsando además el uso de mercados alternativos y circuitos locales de comercialización (Cortés, Vieli y Ibarra 2023)

La diferencia con otras prácticas radica en sus principios desde la teoría ecológica, entendiendo a la finca como un ecosistema, además de su interacción con otras disciplinas científicas para entender la complejidad de interacciones de los diferentes factores que inciden en este ecosistema agrícola (Gliessman 2006). (Imagen 3).



***Imagen 3.** Manejo agroecológico, donde se observa la integración del componente forestal y la diversidad de plantas.*

Con esta base conceptual y entendiendo a la biodiversidad edáfica como bioindicador de la salud del suelo, nos planteamos como objetivo general evaluar los tipos de manejo para la rehabilitación de la biodiversidad y funciones ecológicas de los suelos en cangahua en agroecosistemas altoandinos del Ecuador y como objetivos específicos caracterizar las prácticas de manejo basados en las propiedades químicas y observación directa para el primer capítulo, evaluar la influencia de las prácticas de manejo sobre la biodiversidad del suelo para el segundo capítulo y finalmente para el tercer capítulo nos planteamos como objetivo específico analizar la influencia de las prácticas de manejo sobre las funciones del suelo: velocidad de la descomposición de materia orgánica, contenido de carbono y respiración del suelo.

Pretendemos con la presente investigación entender cuál o cuáles de las prácticas agrícolas realizadas en los Andes ecuatorianos incrementan la macro y mesofauna, así como también su influencia en el contenido de carbono. Los manejos seleccionados fueron los más representativos de las zonas de la investigación, la unidad de estudio fue el suelo con cangahua de agroecosistemas en (re)habilitación con al menos 5 años de intervención antrópica, contado a partir del tercer año en el cual la roca empieza a mostrar estructura en su composición, con el objetivo de generar recomendaciones para agroecosistemas más productivos y regenerativos.

En ese contexto nos planteamos la siguiente pregunta de investigación:

- ¿Cuál es la incidencia de las prácticas de manejo del suelo en la (re)habilitación de las funciones ecológicas del suelo en cangahua y el incremento de la biodiversidad del material endurecido (cangahua) en agroecosistemas de los Andes ecuatorianos?

Como hipótesis general del presente estudio:

- Las prácticas de manejo del suelo aplicadas sobre cangahua inciden positivamente en la rehabilitación de sus funciones ecológicas y en el incremento de la biodiversidad edáfica en agroecosistemas andinos.

Hipótesis específicas:

H1: Las prácticas de manejo del suelo se diferencian significativamente según sus propiedades químicas, lo que permite caracterizarlas como estrategias contrastantes de intervención edáfica.

H2: Las prácticas de manejo del suelo influyen positivamente en la biodiversidad edáfica, incrementando la riqueza y abundancia de organismos del suelo en agroecosistemas con cangahua.

H3: Las prácticas de manejo del suelo mejoran las funciones ecológicas del suelo, evidenciadas por una mayor velocidad de descomposición de materia orgánica, incremento en el contenido de carbono y aumento en la tasa de respiración del suelo.

La presente investigación se realizó en dos localidades de la sierra ecuatoriana: Zona 1 Cacha (Figura 2), ubicada en la provincia de Chimborazo (1°43'27.5"S 78°43'13.8"W) y Zona 2 La Merced (Figura 3), ubicada en la provincia de Pichincha (0°16'50.3"S 78°24'30.8"W), con altitudes entre los 2800 y 3100 msnm (GAD Parroquial Cacha 2023; GAD PICHINCHA 2012).

Estas localidades se seleccionaron por presentar suelos degradados con afloramiento de cangahua y características edafoclimáticas similares, por consiguiente, propiedades físicas, químicas y biológicas restrictivas para su aprovechamiento y conservación, por la dureza y baja porosidad, limitando la actividad biológica y productiva en ese sustrato, lo que afecta principalmente a las funciones ecológicas de los suelos y a la presencia de organismos vitales para su funcionamiento. (FAO 2020).

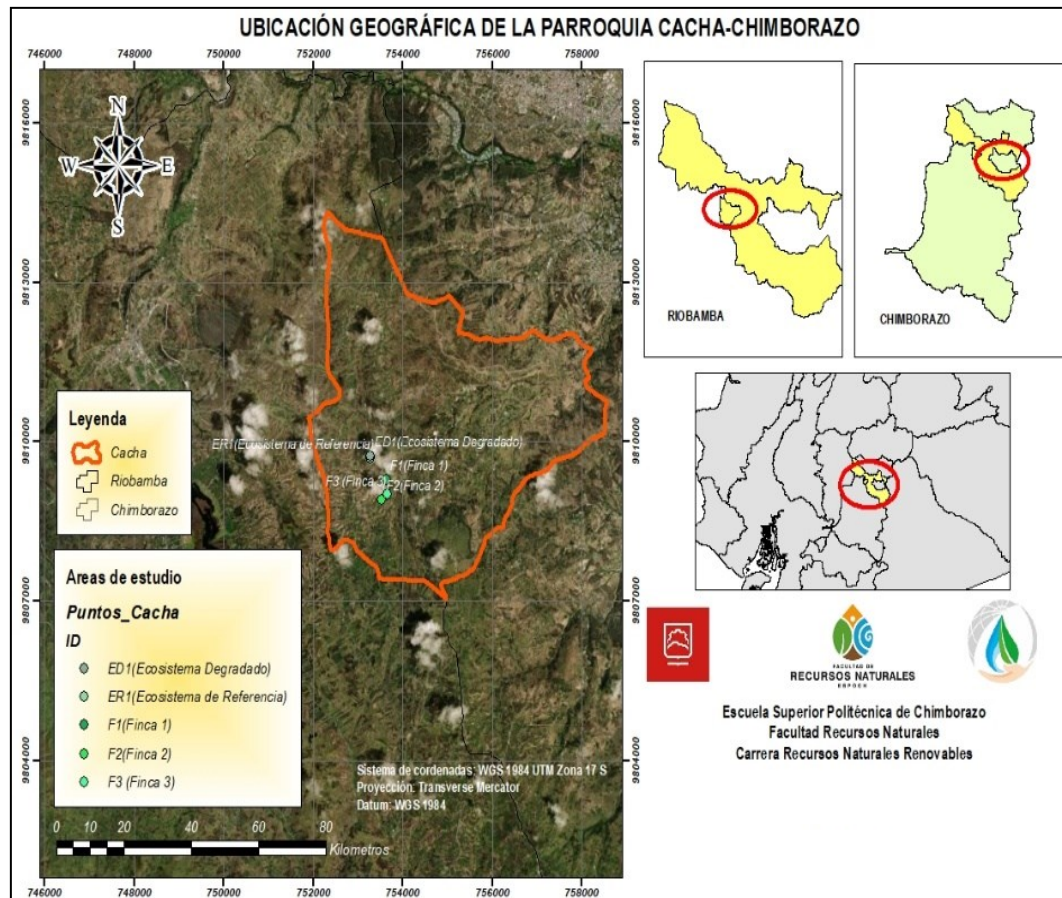
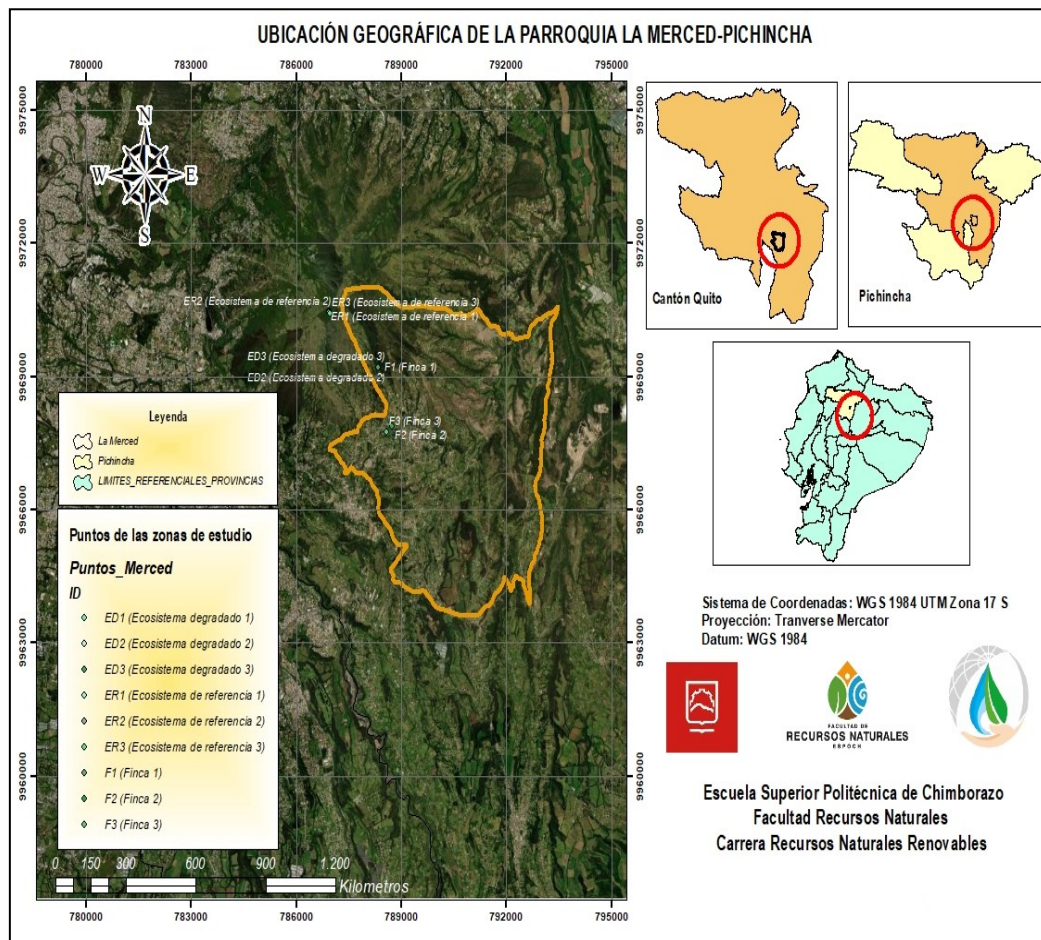


Figura 2. Localización de las unidades amostrales de la Zona 1. Cacha-Chimborazo.



En el primer capítulo se realiza una caracterización de los tipos de manejo estudiados en las dos zonas, así el manejo agroecológico y tradicional fueron comparados con el degradado y barbecho, además para la descripción nos apoyados en análisis estadísticos de las propiedades químicas y en la observación directa.

En el segundo capítulo se evalúa la influencia de las prácticas de manejo sobre la biodiversidad del suelo y se las compara con un ecosistema degradado. Al hablar de biodiversidad del suelo, se refiere específicamente a la presencia de lombrices, artrópodos, hongos y bacterias para lo cual se utilizaron metodologías y diseños estadísticos para su cuantificación, validación y comparación. Finalmente, en el tercer capítulo se analiza cómo las tres prácticas de manejo afectan a las funciones del suelo como la velocidad de la descomposición de materia orgánica, el contenido de Carbono en el suelo y la respiración del suelo con el objetivo de determinar la práctica que tiene mayor influencia en la (re)habilitación de suelos degradados.

CAPITULO I

Caracterización de los manejos agroecológico y tradicional en agroecosistemas altoandinos degradados de Cacha-Chimborazo y La Merced-Pichincha-Ecuador.

Resumen

La degradación de suelos representa una de las principales amenazas para la sostenibilidad agrícola a escala global y local, afectando gravemente la productividad, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos; en el contexto ecuatoriano, alrededor del 47% del territorio continental muestra procesos erosivos y en regiones como Chimborazo y Pichincha el afloramiento de cangahua, un material volcánico endurecido, constituye un desafío crítico para la agricultura, pues limita la retención de agua, la penetración de raíces y la disponibilidad de nutrientes. Frente a esta problemática, el presente estudio se enfocó en caracterizar los agroecosistemas altoandinos de Cacha (Chimborazo) y La Merced (Pichincha), evaluando los efectos de distintos manejos: agroecológico, tradicional y barbecho sobre las propiedades químicas del suelo, comparándolos con ecosistemas degradados como referencia. La investigación se desarrolló mediante, observación en campo y muestreos de suelos, los cuales fueron analizados en laboratorio con metodologías estandarizadas para determinar pH y contenidos de macronutrientes y micronutrientes, complementando con análisis estadísticos multivariados (PCA y PERMANOVA) que permitieron identificar diferencias significativas entre manejos y localidades. Los resultados mostraron que en Cacha, el manejo agroecológico se caracteriza por prácticas localizadas como abonos orgánicos, labranza mínima, terrazas y rotación de cultivos, aplicadas en pequeñas parcelas cercanas a viviendas, mientras que en La Merced el enfoque agroecológico es más sistemático e integrado, combinando diversificación funcional, compost biocompleto, riego eficiente, cobertura vegetal permanente y capacitaciones continuas a través de Escuelas de Campo, con una trayectoria de implementación de 15 años frente a los 5 de Cacha. El manejo tradicional en ambas zonas se basa en la asociación de maíz, fréjol y calabaza, estrategia ancestral que contribuye a la fijación de nitrógeno y a la soberanía alimentaria, aunque con menor capacidad de rehabilitar funciones edáficas si no se complementa con prácticas de conservación. En cuanto al barbecho, en La Merced se practica de forma “activa”, con incorporación de biomasa y cobertura vegetal que favorecen la regeneración del suelo, mientras que en Cacha predomina un barbecho “pasivo” que limita la recuperación. El análisis multivariado reveló diferencias significativas entre manejos y entre zonas, destacando que los suelos bajo manejo agroecológico y tradicional, especialmente en La Merced, presentaron mayores concentraciones de N, P, S, Zn, Fe y Mn, indicadores de mayor actividad biológica y reciclaje de biomasa, en contraste con los suelos degradados que mostraron un pH elevado y bajos niveles de nutrientes. En Cacha, los suelos estuvieron más asociados a

contenidos de K, Ca y Mg, posiblemente por factores edafogeomorfológicos y por el menor tiempo de manejo. Se concluye que la planificación técnica, la sistematización y la escala de aplicación de las prácticas de manejo son determinantes para la rehabilitación edáfica, siendo el modelo agroecológico de La Merced un ejemplo de transición madura hacia sistemas resilientes y sostenibles, mientras que en Cacha la agroecología aún se encuentra en construcción con resultados parciales. En síntesis, los hallazgos confirman que los manejos agroecológicos y tradicionales influyen significativamente en la química del suelo y que su integración, junto con barbechos activos, constituye una vía efectiva para revertir procesos de degradación severa en los Andes ecuatorianos, siempre que se acompañe de innovación técnica, fortalecimiento organizativo y escalamiento territorial.

Palabras clave: Cangahua, restauración edáfica, agroecosistemas altoandinos, agroecología, manejo tradicional.

Abstract

Soil degradation represents one of the most critical threats to global and local agricultural sustainability, severely affecting productivity, biodiversity, and ecosystem services; in Ecuador, approximately 47% of the continental territory is affected by erosive processes, and in regions such as Chimborazo and Pichincha the outcropping of cangahua, a hardened volcanic material poses a major challenge for agriculture by limiting water retention, root penetration, and nutrient availability. Against this background, the present study aimed to characterize high-Andean agroecosystems in Cacha (Chimborazo) and La Merced (Pichincha), assessing the effects of different management systems—agroecological, traditional, and fallow—on soil chemical properties, compared to degraded ecosystems as a control. The research combined semi-structured interviews with local farmers, in situ observations, and soil sampling, which were analyzed in accredited laboratories to determine pH and macro- and micronutrient contents, complemented by multivariate analyses (PCA and PERMANOVA) to identify significant differences between management systems and sites. Results showed that in Cacha, agroecological management is characterized by localized practices such as organic fertilization, minimum tillage, terraces, and crop rotation, implemented in small household plots, while in La Merced the agroecological approach is more systematic and integrated, combining functional diversification, bio-complete

composting, efficient irrigation, permanent cover crops, and continuous training through Farmer Field Schools, with a 15-year implementation history compared to only 5 years in Cacha. Traditional management in both areas relies on the ancestral association of maize, beans, and squash, a strategy that supports nitrogen fixation and food sovereignty, although with limited capacity for soil rehabilitation if not complemented with conservation practices. Regarding fallow, La Merced applies an “active” fallow, incorporating biomass and vegetation cover that enhance soil recovery, whereas Cacha relies on a “passive” fallow with little improvement potential. Multivariate analysis revealed significant differences among management systems and sites: soils under agroecological and traditional management, particularly in La Merced, exhibited higher concentrations of N, P, S, Zn, Fe, and Mn, reflecting greater biological activity and biomass recycling, in contrast with degraded soils, which showed higher pH and lower nutrient levels. In Cacha, soils were more associated with K, Ca, and Mg contents, likely influenced by edaphogeomorphological factors and the shorter period of management. Overall, findings highlight that technical planning, systematization, and implementation scale are key determinants for edaphic rehabilitation, with La Merced representing a mature transition toward resilient and sustainable systems, while Cacha reflects an agroecology still under construction with partial results. In conclusion, the study confirms that agroecological and traditional management significantly influence soil chemistry and that their integration, together with active fallow practices, can provide effective pathways to reverse severe degradation processes in Ecuadorian Andean agroecosystems, provided they are accompanied by technical innovation, organizational strengthening, and territorial scaling.

Keywords: Cangahua, soil restoration, high Andean agroecosystems, agroecology, traditional management.

Introducción

La degradación del suelo es un problema global que afecta la productividad agrícola, la biodiversidad y la estabilidad climática. Según el Atlas Mundial de la desertificación (2018), el 75% de la superficie terrestre ya está degradada, impactando directamente a 3.2 millones de personas, y si la tendencia continua, para el 2050 el 90% de la tierra podría estar degradada. Además, entre 2000 y 2009, la degradación del suelo fue responsable de emisiones anuales de 3.600 a 4.400 millones de toneladas de CO₂.

Según Pesantez (2016), aproximadamente el 47% de la superficie del Ecuador continental está afectada por procesos erosivos en diversas categorías, en el caso específico de la región del Chimborazo, se ha identificado que alrededor del 9,75% de su territorio (ca. 59 mil hectáreas) está afectada. En ese contexto, la caracterización de los agroecosistemas y sus tipos de manejo es esencial para comprender la dinámica de la rehabilitación de los suelos degradados en los Andes ecuatorianos, donde factores edafoclimáticos y el cambio del uso del suelo han influido en la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Así, en las parroquias Cacha-Chimborazo y La Merced-Pichincha, las dos zonas del presente estudio, se pueden observar edafo-paisajes, con presencia de cangahua, un material endurecido de origen volcánico, que acentúa esta problemática, representando un desafío para la conservación del suelo (GAD Parroquial Cacha, 2023; GAD PICHINCHA, 2012). Su afloramiento desde el subsuelo a la superficie es consecuencia tanto de procesos naturales como de la degradación antrópica, asociada a la actividad antropogénica mal direccionada (Palacios Orejuela et al., 2021). Se estima que la cangahua que ha aflorado luego de que el suelo superficial se ha degradado es de 83 000 ha, es decir, 30 % del total de este material endurecido (Hidrobo et al., 2015; INEC, 2016; Podwojewski & Germain, 2005). Este tipo de suelo, característico del callejón interandino ecuatoriano, presenta dificultades para la retención de agua y la penetración de raíces, lo que limita las funciones y servicios ecosistémicos del suelo (Zebrowski, 1996).

Frente a esta realidad, diferentes enfoques de manejo han surgido con el objetivo de rehabilitar los suelos degradados y mejorar sus funciones ecológicas. Entre ellos, el manejo agroecológico que utiliza principios ecológicos basados en la ciencia como la diversificación de cultivos, la acumulación de materia orgánica y la cobertura vegetal, promoviendo la regeneración del suelo y la biodiversidad edáfica (Gliessman, 2006). Por otro lado, el manejo tradicional responde a

conocimientos empíricos transmitidos por generaciones, caracterizados por la asociación de cultivos entre maíz, fréjol y calabaza (Altieri & Nicholls, 2013).

Adicionalmente, el barbecho, entendido como un período de descanso del suelo, cumple un papel clave en la restauración de la fertilidad edáfica, aunque su implementación varía entre regiones y puede ir desde el simple abandono del suelo hasta prácticas más estructuradas que favorecen la acumulación de biomasa y la rehabilitación biológica (Licona & Estupiñán, 2019), para las unidades de estudio éste período de tiempo corresponde a seis meses.

En las zonas de estudio, no se dispone análisis de los ecosistemas según los tipos de manejo, por lo que, este estudio tiene como objetivo caracterizar los agroecosistemas y los manejos agroecológico y tradicional de las zonas de estudio, basados en sus características químicas. También se describen los suelos en estado de degradación y barbecho, con el fin de generar conocimiento sobre los procesos de restauración edáfica en la región. Para ello, en la metodología se realizaron visitas in situ para la observación directa de los sistemas de manejo, muestreo y análisis específicos del suelo como nivel de pH, macronutrientes y micronutrientes, con el fin de determinar la influencia de los tipos de manejo sobre la química del suelo (Mosquera y Ruiz, 2015, p.67-69).

Así, el presente manuscrito busca aportar con información clave sobre la relación que existe entre los tipos de manejo y las principales propiedades químicas de los suelos de las dos zonas, considerando que en Cacha se ha registrado 5 años de manejo y en la Merced 15 años, por lo que se estima que en ésta última localidad se presente mejores condiciones edáficas, además se observó que en la Merced los manejos son más sistemáticos y estructurados. Esta información será la base para entender si los diferentes tipos de manejo están o no influenciando en la composición química del suelo degradado, que se encuentra en proceso de rehabilitación.

Materiales y métodos

Área de estudio

La presente investigación se realizó en dos localidades de la sierra ecuatoriana: Zona 1 Cacha (Figura 1) ubicada en la provincia de Chimborazo ($1^{\circ}43'27.5''\text{S}$ $78^{\circ}43'13.8''\text{W}$) y Zona 2 La Merced ubicada en la provincia de Pichincha ($0^{\circ}16'50.3''\text{S}$ $78^{\circ}24'30.8''\text{W}$), con altitudes entre los 2800 y 3100 msnm (GAD Parroquial Cacha, 2023; GAD PICHINCHA, 2012).

Estas localidades se seleccionaron por presentar suelos degradados con afloramiento de cangahua y características edafoclimáticas similares, por consiguiente, propiedades físicas, químicas y biológicas restrictivas para su aprovechamiento y conservación, por la dureza y baja porosidad, limitando la actividad biológica y productiva en ese sustrato, lo que afecta principalmente a las funciones ecológicas de los suelos y a la presencia de organismos vitales para su funcionamiento. (FAO, 2020).

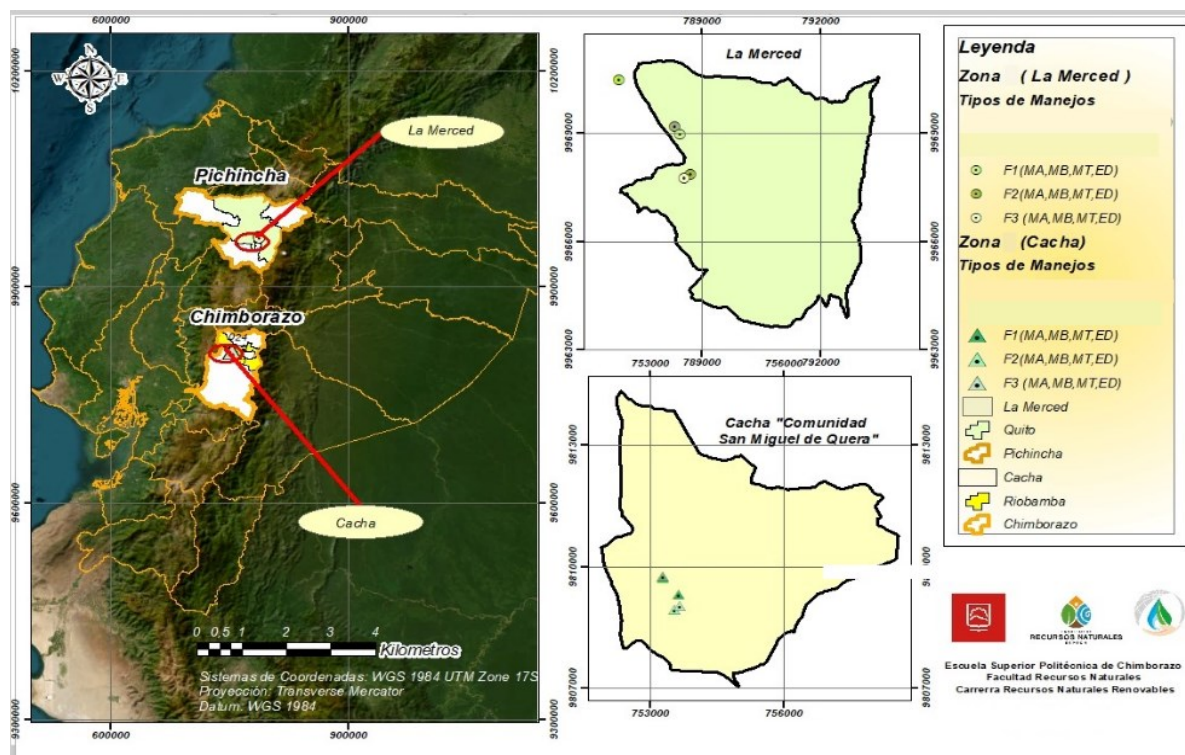


Figura 1. Localización de las unidades de estudio.

Diseño del estudio

Los muestreos de suelos para analizar las propiedades químicas fueron realizados en noviembre del año 2023. Para la determinación de la influencia de las prácticas de manejo sobre las características químicas de los suelos en cangahua, se seleccionaron 2 tipos de manejo de agroecosistemas (unidad de muestreo): manejo agroecológico (MA) y manejo tradicional (MT), se consideró también el barbecho (MB) como un uso de suelo de la localidad. Todos los suelos en rehabilitación debían tener al menos 5 años de intervención, los cuales se compararon con un ecosistema degradado como tratamiento de control (ED), cada unidad de muestreo mide 1000 m².

Metodología

Se realizaron visitas in situ para la observación directa de los sistemas de manejo agroecológico, tradicional y de barbecho, lo que permitió documentar su estado actual y las intervenciones realizadas en cada tipo de sistema. Además, se efectuó un muestreo de suelos en las parcelas bajo cada tipo de manejo, utilizando técnicas estandarizadas de toma de muestras para evaluar sus características químicas.

Los análisis de suelos se realizaron empleando metodologías analíticas estandarizadas en el laboratorio de Suelos, Agua y Plantas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) en Ecuador, que se encuentra acreditado a nivel nacional. La determinación del pH se efectuó mediante el uso de un potenciómetro digital, utilizando la relación suelo: agua de 1:2,5 (Thomas, 1996). Para la cuantificación de nitrógeno total (N) y fósforo disponible (P), se emplearon técnicas colorimétricas luego de una digestión ácida, siguiendo protocolos adaptados de Kjeldahl para N y métodos Olsen modificados para P, según la reacción del suelo (Nelson & Sommers, 1982; Olsen et al., 1954).

Los elementos potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe) y manganeso (Mn) se extrajeron utilizando soluciones de acetato de amonio 1 N a pH 7 y su concentración fue determinada mediante espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) (Jones, 2001; Lindsay & Norvell, 1978). Por último, la determinación de azufre (S) se llevó a cabo mediante turbidimetría, a partir de la formación de un precipitado de sulfato de bario, siguiendo métodos descritos por Tabatabai (1974).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico realizamos 3 repeticiones por cada manejo y por zona, de la misma manera para el suelo degradado y barbecho, con un total de 24 unidades de muestreo, como presenta la Tabla 1. Las variables independientes fueron los tipos de manejo (con cuatro niveles) y las variables dependientes el pH y nutrientes de los suelos de los agroecosistemas.

Para ilustrar las diferencias entre los suelos y sus diferentes manejos, se realizó un PCA (Análisis de Componentes Principales) con los datos químicos del suelo y pH utilizando el programa PCOrd (McCune & Mefford 2018). El análisis de componentes principales reduce la dimensionalidad del conjunto de datos y crea ejes ortogonales que resumen la información contenida en la matriz de datos original (de distancia Euclidiana). Todas las variables se estandarizaron antes del análisis.

Para evaluar el efecto del tipo manejo de suelo y de la zona de estudio (Cacha e La Merced) sobre las características químicas, se realizó un Análisis de Varianza Multivariado Permutacional (PERMANOVA), utilizando una matriz de distancia Euclidiana, con el software PCOrd (McCune & Mefford 2018)

Tabla 1. Número de unidades de muestreo (U.M) en las zonas de estudio

	Manejo Agroecológico (MA)	Manejo Tradicional (MT)	Manejo Barbecho (MB)	Ecosistema Degradado (ED)
Zona 1 (Z1) Cacha	3 Manejos x 3 repeticiones	3 Manejos x 3 repeticiones	3 Manejos x 3 repeticiones	3 U.M x 3 repeticiones
Zona 2 (Z2) La Merced	3 Manejos x 3 repeticiones	3 Manejos x 3 repeticiones	3 Manejos x 3 repeticiones	3 U.M x 3 repeticiones
Total	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.
Total unidades				24 U.M.

Resultados

Caracterización de las prácticas de manejo de los agroecosistemas de Cacha

Manejo agroecológico.

El estudio realizado en la parroquia Cacha, permitió identificar diversas prácticas agroecológicas utilizadas por los productores locales con el fin de recuperar y mejorar la calidad de los suelos degradados. Estas prácticas han sido implementadas con características particulares de cada finca, que varían según su ubicación, pendiente, disponibilidad de recursos hídricos y tipo de manejo aplicado. Se observó que siempre tienen un espacio asignado para el manejo agroecológico, que generalmente es junto a la casa del propietario. Las especies más importantes son las hortalizas de ciclo corto como: Brócoli *Brassica oleracea*, Acelga *Beta vulgaris*, Lechuga *Lactuca sativa*, Remolacha *Beta vulgaris*. Árboles y arbustos como Aliso *Alnus acuminata*, Retama *Spartium junceum*, Taxo *Tropaeolum majus*, Chilca *Baccharis salicifolia*, Marco *Ambrosia peruviana*, Tilo *Tilia cordata*, Lupino *Lupinus angustifolius*.

Entre las prácticas agroecológicas observadas en las fincas de estudio se destacan:

- a) Abonos orgánicos y verdes. Se utiliza estiércol de animales, compost y humus como fuentes principales de fertilización. Además, la incorporación de cultivos de cobertura como *Vicia sativa* y *Avena sativa* que son incorporados en época de prefloración.
- b) Labranza mínima. A través de la reducción de la remoción del suelo, se ha permitido mantener su estructura y disminuir la pérdida de nutrientes. Se observó que esta práctica ha sido efectiva en las fincas con mayor pendiente, donde la erosión es más severa, como se observa en la imagen 1.



Imagen 1. Labranza mínima utilizada en el manejo agroecológico.

c) Rotación y asociación de cultivos. Los productores han implementado esquemas de rotación con cultivos como papa, haba, cebada y quinua con el objetivo de mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, además de contribuir al control de plagas y enfermedades (Imagen 2).



Imagen 2. asociación de cultivos utilizada en el manejo agroecológico

d) Terrazas y barreras vivas. Se han establecido en fincas con mayor pendiente, terrazas y cercas vivas con especies nativas para reducir la erosión hídrica y eólica. Estas estructuras han contribuido a la estabilidad del suelo y a la conservación de la humedad (Imagen 3).



Imagen 3. Utilización de terrazas y barreras vivas para evitar la erosión

e) El uso eficiente del agua. Se han implementado zanjales de infiltración y surcos en contorno para mejorar la captación y retención del agua en el suelo, especialmente en las zonas con menor disponibilidad hídrica.

f) Incorporación del componente animal: En varias fincas, se han integrado sistemas de pastoreo rotacional y crianza de especies menores, con el objetivo de mejorar la fertilidad del suelo a través de los excrementos animales.

Manejo tradicional

El cultivo asociado de maíz con otras especies como fréjol o tubérculos andinos es una práctica agrícola tradicional que ha sido aplicada durante generaciones en Cacha. Este sistema de producción refleja el conocimiento ancestral de los campesinos para la diversificación de cultivos. El fréjol se cultiva junto al maíz debido a la relación simbiótica entre ambas especies. Mientras el maíz proporciona un soporte natural para que el fréjol crezca, este último enriquece el suelo con nitrógeno gracias a la fijación biológica de este nutriente, lo que reduce la necesidad de fertilizantes externos. Esta estrategia contribuye a la conservación de la fertilidad del suelo y a la reducción de plagas y enfermedades.

La cosecha obtenida se destina para el autoconsumo y eventualmente para la comercialización en mercados locales, asegurando una fuente de ingresos para las familias campesinas. Según los testimonios de los agricultores locales, el maíz cosechado se selecciona cuidadosamente para su consumo y para la conservación de semillas (Imagen 4).



Imagen 4. Manejo tradicional de maíz asociado con tubérculos andinos.

Barbecho

El barbecho es una estrategia utilizada en Cacha para la recuperación de suelos degradados. Esta práctica consiste en dejar descansar la tierra por un período determinado (6 meses hasta 1 año) para permitir la regeneración de su estructura y el restablecimiento de los nutrientes esenciales para la producción agrícola y evitar el afloramiento de cangahua.

Los agricultores han identificado varias ventajas de esta práctica, entre ellas el aumento de la materia orgánica, pues al no estar sometido a cultivos constantes, el suelo puede acumular materia orgánica de forma natural. Con estas prácticas se controla la erosión al reducir la remoción del suelo, evitando la compactación y degradación del mismo. En Cacha no se realiza ningún tipo de manejo en éste período de tiempo, en algunos casos se observó que dejan el rastrojo del cultivo en el terreno (Imagen 5).



Imagen 5. Suelo en Barbecho con el rastrojo del cultivo anterior.

Suelo degradado

En Cacha, la degradación del suelo se ha intensificado por prácticas inadecuadas como el uso excesivo de fertilizantes químicos, la eliminación de residuos vegetales y el empleo de maquinaria pesada. Uno de los efectos más notorios de la degradación es la erosión del suelo causada por la acción del agua y el viento, lo que provoca la pérdida de la capa superficial rica en nutrientes,

aflorando la cangahua que es una capa endurecida de suelo volcánico altamente compactado, y que corresponde naturalmente al horizonte C (Imagen 6).



Imagen 6. Suelo degradado con afloramiento de cangahua.

Caracterización de las prácticas de manejo de los agroecosistemas de la Merced.

Manejo agroecológico

En la Merced se observó una integración entre los sistemas agrícolas y silvícolas con especies arbustivas y frutales. Se utilizan abonos orgánicos como compost y humus que son elaborados dentro de las mismas fincas. En este tipo de manejo se han restringido las técnicas agrícolas convencionales como el arado, monocultivo y principalmente la implementación de agroquímicos para controlar plagas y enfermedades.

Para la implementación de este sistema, primeramente, se han realizado análisis del suelo para conocer cuáles son sus requerimientos y así determinar y planificar las prácticas a desarrollarse en el terreno. Cabe resaltar que, el manejo agroecológico en La Merced combina conocimientos adquiridos en capacitaciones con la metodología de Escuelas de Campo (ECAs), desarrolladas por más de 15 años. Las principales prácticas identificadas fueron:

a) Diversificación de Cultivos. Se implementa con planificación y en función de la complementariedad de especies, con el objetivo de reducir la presión de plagas y mejorar la biodiversidad del agroecosistema. Así se asocian hortalizas con plantas medicinales, especies forestales y arbustivas (Imagen 7).



Imagen 7. Diversificación funcional en el manejo agroecológico

b) Rotación de cultivos. Se seleccionan especies estratégicamente para evitar el agotamiento del suelo y mejorar su estructura y fertilidad. Además, con esta práctica se busca interrumpir el ciclo fisiológico de ciertas plagas. Se rotan por ejemplo hortalizas con tubérculos y gramíneas (Imagen 8).



Imagen 8. Rotación de cultivos, en éste mismo predio estaba maíz en la cosecha anterior

c) Terrazas. En los sectores con pendiente se ha diseñado terrazas con curvas de nivel para reducir la erosión y favorecer la infiltración del agua (Imagen 9).



Imagen 9. Utilización de terrazas para disminuir la degradación del suelo.

d) Cobertura del suelo. Se emplean residuos de cosechas o cultivos de cobertura (avena y vicia principalmente) para conservar la humedad y proteger el suelo de la erosión. También se observó que se utiliza material leñoso proveniente de aserraderos para cubrir el suelo y mejorar la actividad biológica (Imagen 10).



Imagen 10. Utilización cobertura (mulch) para mejorar la actividad biológica del suelo.

e) Abonos verdes. Se siembran plantas de rápido crecimiento principalmente avena y vicia para incrementar la materia orgánica del suelo y activar la microbiota del suelo antes de establecer los cultivos principales.

f) Uso de compost y abonos orgánicos. Se elabora el compost biocompleto a partir de residuos vegetales y estiércol de animales para mejorar la fertilidad del suelo. También se utiliza los lixiviados de éste para reactivar la vida del suelo (Imagen 10)



Imagen 10. Elaboración de abonos orgánicos para incrementar el contenido de materia orgánica.

g) Cosecha de agua. Se utilizan técnicas de captación y almacenamiento de agua de lluvia para garantizar su disponibilidad en épocas secas.

h) Sistemas de riego eficiente: Se implementa el riego por goteo o aspersión para optimizar el uso del recurso hídrico.

i) Barreras vivas: Se siembran plantas repelentes de plagas como la Ruda *Ruta graveolens*, Citronela *Cymbopogon citratus*, Menta *Mentha spicata*, Caléndula *Calendula officinali* en los bordes de los cultivos para evitar su proliferación (Imagen 11).



Imagen 11. Barreras vivas en el manejo agroecológico

Manejo tradicional

El manejo tradicional de los cultivos se basa en conocimientos transmitidos de generación en generación, con prácticas agrícolas que han demostrado su efectividad en la optimización del uso del suelo y la mejora de la fertilidad sin necesidad de insumos químicos. Una de las estrategias más comunes dentro de este manejo es la asociación de cultivos, destacando la combinación de maíz, frejol y calabaza, un sistema que no solo maximiza el aprovechamiento del espacio, sino que también ofrece beneficios agroecológicos significativos.

La combinación de estos cultivos mejora la biodiversidad del agroecosistema, promoviendo la resiliencia frente a plagas y enfermedades. El maíz se siembra con una separación de 30 cm entre plantas, El frejol se planta a 15 cm de distancia de cada tallo de maíz, permitiendo que trepe sin competir por espacio. La calabaza se siembra entre las hileras, con una distancia de 90 cm entre plantas, asegurando suficiente espacio para su expansión.

En este tipo de manejo únicamente se utilizan herramientas manuales para el labrado del suelo, no es necesaria la implementación de agroquímicos sino únicamente se agregan abonos generados por los animales de las mismas fincas como cuyes o conejos. La cobertura del suelo con materia orgánica contribuye a la retención de humedad y a mejorar de la estructura del suelo. Por otro lado, con este manejo se contribuye a la autosuficiencia y seguridad alimentaria, ya que la producción es destinada principalmente al autoconsumo y a la venta en pequeña escala (Imagen 12).



Imagen 12. Manejo tradicional donde se observa el maíz como cultivo principal

Barbecho

El barbecho constituye una de las prácticas agrícolas más antiguas empleadas en La Merced, ubicada en la provincia de Pichincha, Ecuador. Esta técnica tradicional consiste en el descanso programado del suelo, durante el cual no se realizan actividades de cultivo ni de labranza sobre la parcela seleccionada. En este periodo, que puede variar de algunos meses a más de un año, se permite que la vegetación natural recubra el suelo de manera espontánea, lo que facilita la regeneración paulatina de las condiciones edáficas.

Durante el barbecho, la materia orgánica se acumula naturalmente a través de la caída de hojas y residuos vegetales, lo que propicia una mejora en la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y la reactivación de procesos biológicos clave. Además, se coloca material vegetal proveniente de la misma parcela y de terrenos cercanos, observándose hasta 40 cm de material incorporado en este proceso.

Esta práctica mantiene una vigencia notable dentro del contexto del uso de la tierra, al ser reconocida como una estrategia efectiva para la recuperación de suelos degradados. No obstante, el barbecho enfrenta importantes limitaciones en su implementación actual como el aumento de la presión sobre la tierra debido al crecimiento poblacional y a la intensificación de la agricultura ha reducido el tiempo disponible para que el suelo descanse adecuadamente. Esta manera de utilizar y regenerar el suelo es utilizada sobre todo en el manejo agroecológico y eventualmente en el tradicional con la incorporación de estiércol de bovinos y especies menores (Imagen 13).



Imagen 13. Acumulación de materia orgánica en el suelo en descanso o barbecho.

Suelo degradado

La Merced, al ubicarse en la zona rural del valle de los Chillos, presenta una alta dependencia de la agricultura. Se ha observado una preocupante degradación de los suelos, evidenciada a través de observaciones directas de campo y entrevistas con agricultores locales. Se observó pérdida progresiva de la capa superficial fértil, especialmente en zonas de pendiente donde no se aplican prácticas de conservación de suelos. Las lluvias intensas y la escasa cobertura vegetal agravan este fenómeno. Se ha observado el afloramiento de Cangahua (Horizonte C) sobre el cual la población local ha tenido que adecuar este material volcánico endurecido para garantizar la seguridad alimentaria. También se ha observado la compactación y pérdida de estructura ocasionada por la labranza intensiva y el uso reiterado de maquinaria pesada han generado compactación en el horizonte superficial, lo que disminuye la infiltración de agua y la aireación, afectando el desarrollo radicular de los cultivos. En el mismo sentido, los agricultores de La Merced manifiestan que sus tierras “ya no producen como antes”, lo que refleja una pérdida de productividad asociada directamente al deterioro del suelo. Esta situación pone en riesgo su autosuficiencia alimentaria y genera mayor presión sobre los agroecosistemas (Imagen 14).



Imagen 14. Suelo degradado, donde se observa la cangahua aflorada a la superficie.

Relación entre las propiedades químicas y los tipos de manejo.

El análisis PERMANOVA mostró diferencias significativas en la química del suelo entre los tipos de manejo ($F_{3,16} = 4,86$, $p = 0,0033$) y entre las dos zonas ($F_{1,16} = 7.86$, $P = 0.0031$). No se encontró interacción entre el efecto de la zona y el tipo de manejo sobre las propiedades químicas del suelo ($F_{3,16} = 1,39$, $p = 0.241$). Las comparaciones a posteriori por pares mostraron que la química del suelo del ecosistema degradado era diferente de todos los demás tipos de manejo ($P < 0,001$ en todas las comparaciones). Como indica el análisis PCA (Fig. 3), en general los ecosistemas degradados tenían un pH más alto y un menor contenido de nutrientes que los otros tipos de manejo. Por otra parte, e independientemente del tipo de manejo, los suelos de Cacha tuvieron la tendencia a un mayor contenido de bases (K, Ca y Mg) que los suelos de La Merced, mientras que estos últimos presentaron contenidos más elevados de N y P, así como mayores contenidos de Zn, Fe, S y Mn (Fig. 3).

El eje 1 del PCA explicó el 44,86 % de la variación de los datos y se correlacionó positivamente con el pH y negativamente con el contenido de N, P, S, Zn, FE y Mn, mientras que el eje 2 del PCA explicó el 18,41 % de la variación de los datos y se correlacionó negativamente con el contenido de K, Ca y Mg (Figura 3). Al comparar las puntuaciones del PCA1, se observaron diferencias significativas entre las dos zonas ($F_{1,16} = 22,57$, $P < 0,001$) y los tipos de manejo ($F_{3,16} = 7,91$, $p = 0,0018$), mientras que para las puntuaciones del PCA 2 hubo diferencias entre zonas ($F_{1,16} = 8,64$, $P = 0,009$), pero no entre tipos de manejo ($F_{3,16} = 2,45$, $p = 0,100$), (figura 4).

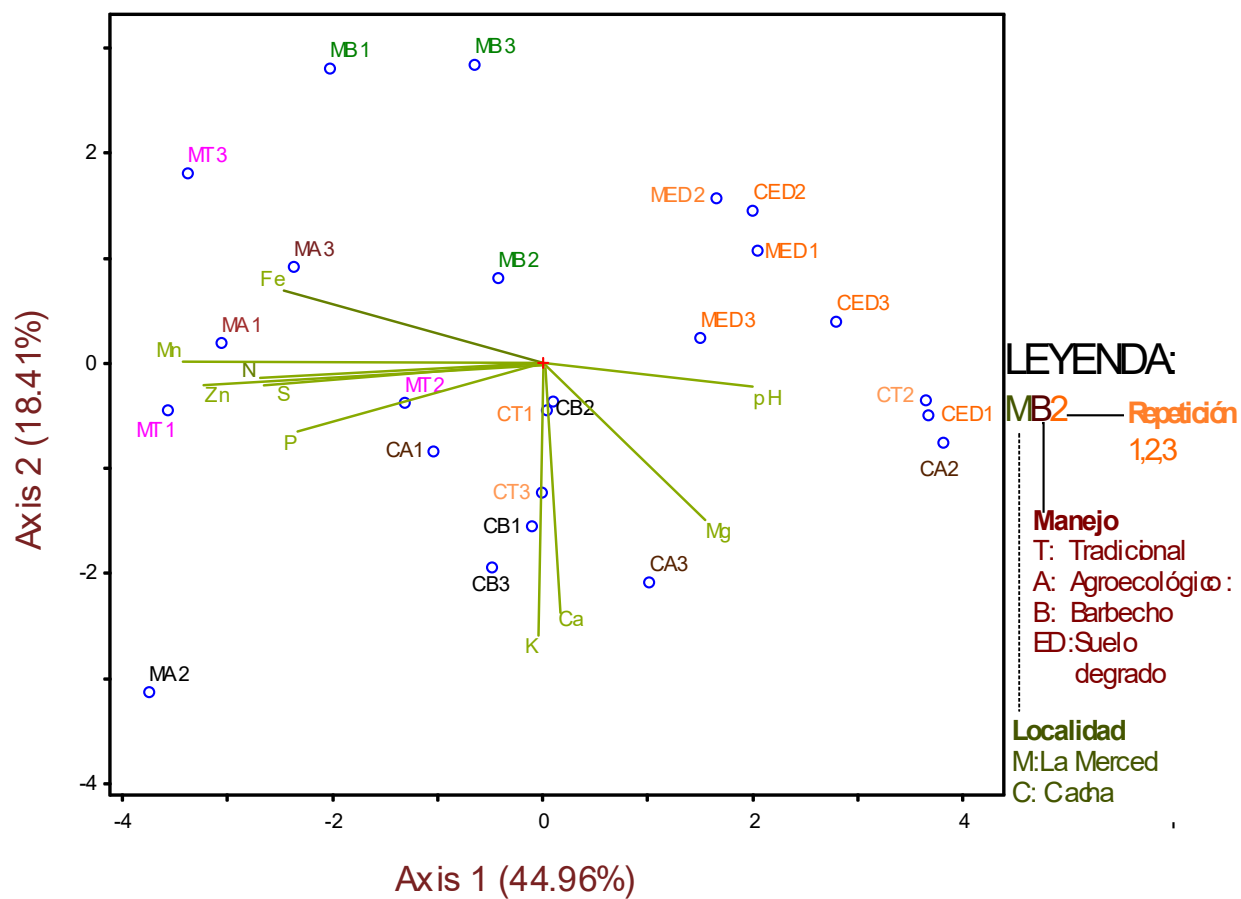


Figura 3. Relación entre los tipos de manejo de Cacha y la Merced y los nutrientes de los Suelos de los agroecosistemas. Los puntos azules con la letra M pertenecen a la Merced y con la letra C a Cacha, la letra A al manejo agroecológico, T al tradicional, B a barbecho y ED al ecosistema degradado.

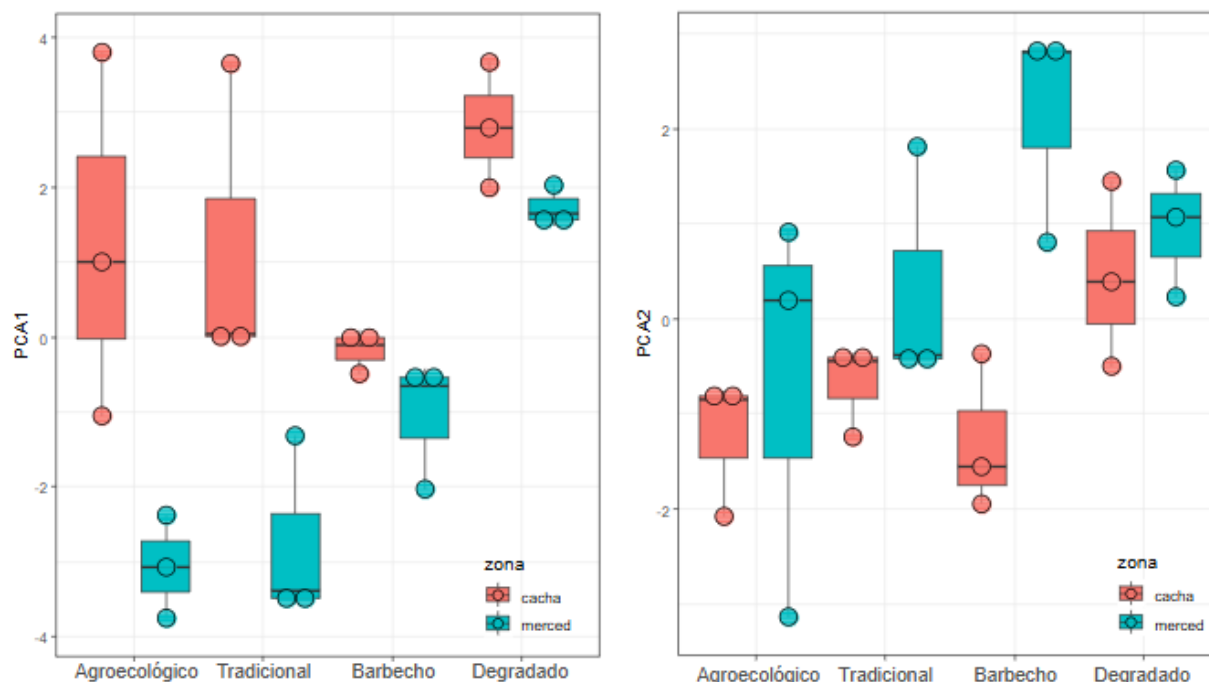


Figura 4. Diferencias en las puntuaciones de los ejes PCA 1 y 2 según los tipos de manejo de Cacha y la Merced.

Discusión

Caracterización de las prácticas de manejo en los agroecosistemas de la Merced y Cacha.

La caracterización de las prácticas de manejo agroecológico y tradicional en los agroecosistemas altoandinos de Cacha y La Merced permitió identificar diferencias en términos de diseño, sistematicidad y potencial para la rehabilitación de suelos con cangahua degradados. Estas diferencias podrían estar influenciadas por el enfoque técnico, la disponibilidad de recursos, el nivel de articulación entre conocimiento tradicional y científico en cada localidad y la vinculación con mercados locales (Altieri et al., 2017).

Así, en Cacha el manejo agroecológico se caracteriza por una implementación localizada, generalmente en áreas pequeñas cercanas a las viviendas, donde se emplean prácticas como el uso de abonos orgánicos, abonos verdes, labranza mínima, asociación y rotación de cultivos, y la construcción de terrazas y barreras vivas, estrategias que responden a condiciones específicas del terreno, como la pendiente y los escasos del recurso hídrico. No obstante, su aplicación carece de una planificación integrada a nivel de finca o paisaje, lo cual puede limitar su efectividad para revertir procesos avanzados de degradación (García-Ruiz et al., 2013). La menor sistematicidad

observada en Cacha concuerda con estudios que advierten que sin una planificación y combinación técnica de prácticas agroecológicas, el impacto en la rehabilitación de suelos puede ser marginal (Chivenge, Vanlauwe & Six, 2011).

En contraste, el enfoque agroecológico en La Merced presenta una mejor organización y tecnificación. Las prácticas identificadas como la diversificación funcional de cultivos, uso de compost biocompleto y abonos verdes, junto con sistemas de riego eficiente, terrazas en curvas de nivel y cobertura vegetal permanente, responden a un diseño agroecológico sistémico que nace de un análisis de suelos y responde a una necesidad de rehabilitar los suelos con cangahua degradados. Además, este modelo ha sido impulsado mediante procesos de capacitación continua a través de Escuelas de Campo (ECAs), lo que podría generar una apropiación técnica y cultural de los principios agroecológicos y sobre todo sostenibilidad en el tiempo.

En ese sentido Altieri et al. (2017) menciona que, la eficacia de los sistemas agroecológicos radica precisamente en su capacidad para integrar procesos ecológicos y conocimiento local en función de un diseño técnico, adaptativo y resiliente. La Merced representa un ejemplo de transición agroecológica madura, acorde a los principios planteados por Gliessman (2016) sobre la necesidad de rediseñar los sistemas agrícolas en función de la diversidad funcional y la salud del suelo. Además, los agricultores están vinculados a mercados locales que podría ser una motivación económica adicional para el manejo sistemático de los agroecosistemas.

Estas diferencias socioecológicas y técnicas entre las dos localidades podrían marcar también un diferencial en la rehabilitación de los suelos degradados entre las dos zonas. Así, en La Merced, las prácticas agroecológicas han logrado mejorar la fertilidad del suelo, situación que se ha reportado en otros estudios en agroecosistemas de montaña similares (Lal, 2015; Mäder et al., 2002). En cambio, en Cacha, aunque las prácticas agroecológicas aportan a la conservación del suelo, la limitada escala y sistematización en su aplicación han impedido una recuperación completa de los nutrientes esenciales, especialmente en zonas de alta pendiente y mayor erosión, diferenciándose poco del tratamiento testigo o suelo degradado. Otro factor clave podría ser el tiempo de implementación de las prácticas de manejo siendo de 15 años para La Merced y sobre los 5 años para Cacha (Derpsch & Friedrich, 2009).

Al hablar del manejo tradicional para las dos localidades, este se basa en la asociación de maíz con fréjol o tubérculos andinos, estrategias que contribuyen a la diversificación funcional y a la salud

y fertilidad del suelo a través de la fijación biológica de nitrógeno y la cobertura. No obstante, su impacto para rehabilitar las funciones ecológicas del suelo es limitado si no se complementa con prácticas de conservación y reciclaje de nutrientes. Así, los sistemas tradicionales pueden ser sostenibles a nivel socioeconómico, pero requieren intervenciones adicionales para ser agroecológicamente robustos frente a la degradación edáfica sin embargo, su valor para la soberanía alimentaria y la conservación de semillas locales es indiscutible (Drinkwater & Snapp, 2007).

En cuanto al barbecho, su uso mostró efectos variables entre las dos localidades. En La Merced, el barbecho “activo” en el que se incorpora cobertura vegetal y materia orgánica hasta 40 cm de biomasa acumulada, evidenció un mayor potencial de rehabilitación edáfica (como lo refleja los análisis PCAs) que se refleja en una recuperación más rápida del contenido nutricional del suelo. En contraste, en Cacha, el barbecho “pasivo” es decir sin manejo complementario o terrenos en descanso, limita la rehabilitación de los suelos, especialmente en zonas con alta pendiente y riesgos de erosión, según Derpsch & Friedrich (2009).

Relación entre las propiedades químicas y los tipos de manejo.

Los resultados obtenidos en el análisis multivariado refuerzan la comprensión de cómo el tipo de manejo influye en la dinámica de nutrientes del suelo en agroecosistemas altoandinos. La asociación de los manejos agroecológico y tradicional con nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), zinc (Zn), hierro (Fe) y manganeso (Mn) en la localidad de La Merced sugiere una mayor actividad biológica y disponibilidad de nutrientes, posiblemente vinculada al uso de prácticas que favorecen el reciclaje de biomasa, la aplicación de abonos orgánicos y la diversidad de cultivos (Altieri et al., 2017; Tittonell, 2020), prácticas que fueron identificadas en esta localidad.

Estos hallazgos son consistentes con investigaciones que evidencian la capacidad de los sistemas diversificados y biológicamente activos para restaurar funciones edáficas clave (Altieri & Nicholls, 2013; Gliessman, 2006). En particular, la relación positiva del manejo agroecológico con los nutrientes mencionados puede atribuirse a las prácticas identificadas en campo como: abonos orgánicos, cultivos de cobertura, terrazas y barreras vivas que se documentaron especialmente en la zona de La Merced, donde se han implementado durante más de 15 años. En ese mismo contexto, la acumulación de micronutrientes como Fe y Mn puede estar relacionada con condiciones de

mayor actividad microbiana y materia orgánica, elementos que tienden a mejorar en sistemas agroecológicos bien manejados (Lal, 2016). La evidencia científica respalda que los sistemas diversificados y con enfoque ecológico no solo mejoran la disponibilidad de macro y micronutrientes, sino que también promueven la resiliencia agroecosistémica frente a perturbaciones climáticas o degradación (Drinkwater & Snapp, 2007; Chivenge et al., 2015).

Por otro lado, la correspondencia de los suelos de Cacha con nutrientes como potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) podría estar influenciada por factores edafogeomorfológicos, como la litología de base, o por el efecto residual de prácticas tradicionales que no promueven una incorporación activa de materia orgánica (Mäder et al., 2002; García-Ruiz et al., 2013). Otra causa de ésta acumulación podría ser los apenas 5 años que se viene desarrollando esas prácticas con lo que todavía conservan varios de sus componentes del material parental (cangahua) como el K, Ca y Mg. Asimismo, algunas prácticas documentadas en este manejo como: la incorporación de residuos vegetales postcosecha y el uso de abonos provenientes de especies menores como cuyes, conejos o bovinos, podrían contribuir a la disponibilidad de bases como Ca^{2+} y Mg^{2+} (Palm et al., 2001; Lal, 2006).

Al comparar las dos zonas de estudio, en La Merced existe una planificación técnica detallada para los manejos agroecológico y tradicional, lo que podría explicar que el suelo degradado sea diferente del resto de manejos, mientras que en Cacha el suelo con cangahua (degradado) está a un nivel similar a los manejos, otro factor que podría explicar esta situación es el tiempo de manejo, siendo 15 años en Merced y 5 en Cacha, además que no se aplica barbecho “activo”. (Toledo & Barrera-Bassols, 2008; Altieri & Nicholls, 2013).

En efecto, el análisis PERMANOVA reveló diferencias estadísticamente significativas tanto entre las zonas geográficas (Cacha y La Merced) como entre los tratamientos aplicados ($P < 0.001$), lo cual indica que tanto los factores edafoclimáticos y el historial de uso del suelo, como las estrategias de manejo agroecológico y tradicional ejercen una influencia diferenciada sobre la composición química del suelo. Este resultado es coherente con estudios que destacan cómo los gradientes edafoclimáticos pueden modular la respuesta del suelo a las prácticas de manejo (Six et al., 2002; Diekmann et al., 2021).

Sin embargo, la ausencia de interacción estadísticamente significativa entre la zona y el tipo de manejo ($P = 0.24$) sugiere que los efectos del manejo sobre la rehabilitación del suelo son

relativamente robustos entre contextos geográficos, es decir que, tanto en Cacha como en La Merced, los mismos tipos de prácticas conducen a patrones similares en lo referente a características químicas, aunque con distinta magnitud (Tittonell et al., 2012; Astier et al., 2011).

Finalmente, los suelos degradados utilizados como tratamiento control, se diferenciaron significativamente de todos los demás manejos ($P < 0.001$), evidenciando el efecto de los manejos sobre la rehabilitación de suelos de agroecosistemas andinos degradados con afloramiento de cangahua (Podwojewski & Germain, 2005). Además, al realizar la comparación par a par se refuerza esta evidencia, observando que todos los manejos son estadísticamente diferentes al ecosistema degradado, recalcando la importancia de los procesos de rehabilitación de suelos con prácticas sostenidas y planificadas (Lal, 2015; FAO, 2020).

Conclusiones e implicaciones

Integrando los resultados de la caracterización de los agroecosistemas con los análisis químicos de los suelos de las dos zonas se concluye que, la eficacia de las prácticas de manejo para la restauración de suelos degradados depende no solo del tipo de práctica utilizada, sino de su planificación, escala de implementación y grado de integración con procesos ecológicos. Así, en La Merced se observó un modelo avanzado de transición agroecológica, mientras que Cacha representa una agroecología todavía en construcción, aún limitada por factores técnicos y socioeconómicos. En ese sentido, promover procesos de innovación, fortalecimiento organizativo e integración con mercados alternativos de comercialización, podría acelerar la adopción de prácticas regenerativas más efectivas en contextos similares.

Los resultados obtenidos evidencian que los manejos agroecológico y tradicional en agroecosistemas altoandinos ejercen una influencia significativa sobre las propiedades químicas del suelo, lo cual respalda la hipótesis de que las prácticas de manejo rehabilitan algunas características de suelos degradados con cangahua. Se concluye que, la integración de prácticas locales tradicionales con principios agroecológicos modernos (integrar los dos manejos) podrían constituir una vía efectiva para la rehabilitación de las características químicas de los suelos degradados especialmente en zonas de alta fragilidad edáfica como los Andes ecuatorianos.

En el mismo sentido, la diferenciación clara entre suelos degradados y aquellos bajo manejo (agroecológico o tradicional) confirmada por la comparación par a par, refuerza la conclusión de

que la rehabilitación de suelos requiere de intervenciones planificadas y sostenidas, ya que los procesos naturales de regeneración son lentos o incluso insuficientes en condiciones de alta degradación y vulnerabilidad como los suelos volcánicos de los andes ecuatorianos.

Por otro lado, existe una clara diferencia entre los agroecosistemas de Cacha y La Merced y su influencia con los diferentes manejos, el hecho de que en La Merced exista una planificación técnica y sistematizada para los manejos agroecológico y tradicional ha marcado que el suelo degradado sea diferente del resto de tratamientos, mientras que en Cacha no se diferencian. Recalcando de esta manera la importancia de la sistematización y aplicación técnica de las prácticas de manejo para la rehabilitación de los suelos degradados. Además, otro factor que podría explicar esta situación podría ser el tiempo de manejo, siendo 15 años en Merced y 5 en Cacha

En síntesis, el suelo degradado representa el extremo del continuo de calidad edáfica observado en los agroecosistemas estudiados. Mientras el manejo agroecológico intensivo y planificado, como el de La Merced, demuestra un alto potencial para revertir la degradación; el manejo tradicional y el barbecho pasivo, más comunes en Cacha, ofrecen beneficios parciales que no son suficientes frente a condiciones de degradación severa. Por lo tanto, se requiere una transición agroecológica intencional y territorialmente articulada, que permita escalar prácticas regenerativas hacia parcelas degradadas, integrando conocimientos locales y soporte técnico especializado.

CAPITULO II

Influencia de las prácticas de manejo de suelo en la biodiversidad edáfica en agroecosistemas altoandinos

Resumen

La biodiversidad edáfica constituye un indicador esencial de la calidad y funcionalidad de los suelos, pues regula procesos ecológicos clave como el reciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica y la resiliencia frente a perturbaciones; en los agroecosistemas altoandinos, caracterizados por suelos frágiles con presencia de cangahua y altos niveles de degradación, las prácticas de manejo resultan determinantes para conservar o restaurar esta biodiversidad, por lo que el presente estudio analizó comparativamente el efecto de distintos tipos de manejo: agroecológico, tradicional, barbecho y ecosistema degradado en dos localidades representativas: Cacha (Chimborazo) y La Merced (Pichincha). Se evaluaron indicadores microbiológicos (microbiomasa, relación hongo/bacteria) y faunísticos (abundancia de lombrices y artrópodos), mediante muestreos realizados en parcelas con al menos cinco años de intervención en Cacha y quince en La Merced, complementados con análisis estadísticos multivariados (PCA y PERMANOVA). Los resultados mostraron diferencias claras entre zonas y manejos: en Cacha, la abundancia de lombrices y artrópodos fue similar entre los manejos agroecológico, tradicional y barbecho, aunque siempre superior al ecosistema degradado, evidenciando un efecto positivo de los manejos frente al deterioro; mientras que en La Merced se observó mayor abundancia de estos grupos en el manejo agroecológico que en el tradicional, lo que se explica en parte por el barbecho activo incorporado en este sistema, que mantiene altos niveles de biodiversidad edáfica. Para bacterias y hongos, todos los manejos mostraron valores semejantes, aunque superiores al ecosistema degradado, sin interacción entre zonas y manejo, lo que indica que el barbecho no es determinante para explicar las diferencias microbianas. Sin embargo, comparando entre zonas, La Merced presentó mayor microbiomasa y una relación hongos:bacterias más alta que Cacha, atribuible al mayor tiempo de rehabilitación de los suelos (15 frente a 5 años), lo que confirma la importancia de la temporalidad y continuidad de las prácticas. En conjunto, los resultados evidencian que el manejo agroecológico en La Merced, implementado de forma sistemática y prolongada, favoreció la mayor actividad microbiana y faunística, reflejando un modelo de transición agroecológica madura, mientras que en Cacha, donde las prácticas agroecológicas son incipientes y menos planificadas, la biodiversidad edáfica se mantuvo más cercana a la observada en suelos degradados. El manejo tradicional, basado en la asociación de maíz, fréjol y calabaza, mostró contribuciones parciales a la diversidad edáfica, aunque inferiores a las del agroecológico, mientras que el barbecho activo en La Merced incrementó significativamente la fauna edáfica, a

diferencia del barbecho pasivo en Cacha que no presentó efectos relevantes. En conclusión, este estudio demuestra que las prácticas de manejo del suelo influyen de manera diferenciada en la biodiversidad edáfica de agroecosistemas altoandinos, con un mayor efecto en la microbiota y macrofauna cuando se aplican sistemas agroecológicos planificados y barbechos activos de larga duración, frente a los efectos más limitados de los sistemas tradicionales y barbechos pasivos; así, se confirma que la combinación de conocimiento local y enfoques agroecológicos sostenidos constituye una estrategia clave para restaurar la salud biológica de los suelos volcánicos degradados de los Andes ecuatorianos.

Palabras clave: Biodiversidad edáfica, manejo agroecológico, microbiomasa del suelo, restauración de suelos degradados, cangahua.

Abstract

Soil biodiversity is a key indicator of soil quality and functionality, regulating essential ecological processes such as nutrient cycling, organic matter decomposition, and resilience to disturbances. In fragile high-Andean agroecosystems, characterized by volcanic soils with cangahua and high levels of degradation, soil management practices are critical for conserving or restoring this biodiversity. This study analyzed the influence of different management systems agroecological, traditional, fallow, and degraded ecosystem on soil biota in two representative localities: Cacha (Chimborazo) and La Merced (Pichincha). Microbiological indicators (microbial biomass, basal respiration, fungi-to-bacteria ratio) and faunal groups (earthworms and arthropods) were evaluated through soil sampling in plots under at least five years of management in Cacha and fifteen years in La Merced, complemented by multivariate analyses (PCA and PERMANOVA). Results revealed clear differences across sites and managements: in Cacha, earthworm and arthropod abundance was similar among agroecological, traditional, and fallow soils, but all exceeded the degraded ecosystem, evidencing the positive impact of management practices. In La Merced, agroecological soils showed greater abundance of earthworms and arthropods than traditional systems, partly explained by the incorporation of active fallows, which maintained high levels of soil biodiversity. For bacteria and fungi, all management systems exhibited similar values, consistently higher than degraded soils, with no interaction between site and management, suggesting that fallow is not a key factor in microbial differences. However, La Merced displayed higher microbial biomass and a greater fungi-to-bacteria ratio than Cacha, attributable to the longer

rehabilitation period (15 vs. 5 years), confirming the relevance of management duration and continuity. Overall, agroecological management in La Merced, systematically implemented over time, enhanced microbial and faunal diversity, representing a mature agroecological transition, whereas in Cacha, where practices are less structured and more recent, soil biodiversity remained closer to degraded conditions. Traditional management, based on maize–bean–squash associations, contributed partially to soil biodiversity, though less than agroecological practices, while active fallows in La Merced significantly improved soil fauna compared to passive fallows in Cacha, which had limited effects. In conclusion, this study demonstrates that soil management practices exert differentiated influences on edaphic biodiversity in high-Andean agroecosystems, with the strongest effects observed under long-term, systematic agroecological systems and active fallows, while traditional systems and passive fallows offer only partial benefits. These findings confirm that sustained agroecological transitions, integrating local knowledge with scientific approaches, are essential for restoring the biological health of degraded volcanic soils in the Ecuadorian Andes.

Keywords: Soil biodiversity, agroecological management, soil microbiome, restoration of degraded soils, cangahua.

Introducción

Algunos de los ecosistemas de los países de América del Sur, América Central y México están estrechamente relacionados con la influencia de los volcanes por lo que, la cuarta parte de éstos países tienen suelos originarios de material piroclástico (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997; Hofstede 2023; Podwojewski, Janeau y Leroux 2008). En consecuencia, en gran parte de la Sierra Central y Norte del Ecuador existe un material endurecido procedente de erupciones de hace miles de años presente naturalmente bajo el suelo, pero la degradación antrópica como consecuencia del cambio del uso del suelo, las malas prácticas agrícolas, la presencia de fuertes pendientes y la misma composición de éste material volcánico lo ha dejado aflorado en la superficie (Orejuela, Huera y Villacrés 2018; Jimenez Merino, Loayza y Metzler 2018).

Este material se denomina cangahua (aflorante y en profundidad) que en la lengua nativa de Ecuador significa “tierra dura” (Orejuela, Huera y Villacrés 2018). Se encuentra desde el Sur de la provincia de Chimborazo hasta el Carchi ubicado al norte del país, ocupa un área aproximada de 270.000 ha (15 % de total de suelo cultivable de la Sierra) entre los 2200 y 3500 msnm. Se estima que la cangahua que ha aflorado luego de que el suelo superficial se ha degradado es de 83.000 ha correspondiendo al 30 % (Podwojewski y Germain 2005; Hidrobo et al. 2015; INEC 2016). Este material endurecido se presenta como una capa estéril que proviene de antiguas rocas piroclásticas, edafológicamente corresponde al horizonte C y se origina a partir de tobas no consolidadas pero desecadas o depósitos piroclásticos (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997).

Los afloramientos de cangahua constituyen un característico paisaje erosionado de los Andes, casi desprovistos de vegetación, con fuertes pendientes y capas subyacentes como si fueran losas de cemento (Orejuela, Huera y Villacrés 2018). Este subsuelo aflorado es bajo en nutrientes y materia orgánica, sin embargo, la población local lo acondiciona para la agricultura generalmente con prácticas insostenibles con la consecuente degradación del mismo. Esto genera otros impactos socio-ecológicos como la migración o la expansión de la frontera agrícola hacia ecosistemas sumamente frágiles como el páramo (Podwojewski y Germain 2005). En efecto, ésta degradación en sentido más amplio afecta la calidad de vida y la economía de aquellos que hacen uso de este recurso, que generalmente son las poblaciones más deprimidas (FAO 2017).

Sin embargo, en este escenario complejo varios estudios demuestran que es posible (re)habilitar este material estéril para convertirlo en suelo vivo y productivo, según estudios realizados en

México, Centro América y el Ecuador (Hidrobo et al. 2015; Bellosi y Cantil 2012; Podwojewski y Germain 2005; Jiménez, Loayza y Metzler 2018), reestableciendo de ésta manera la salud del suelo y su biodiversidad, la cual cumple un rol importante en la dinámica de los ecosistemas terrestres. Entre las funciones más importantes de la biodiversidad edáfica está la descomposición de la materia orgánica, la interacción con el ciclo de nutrientes, las transformaciones biogeoquímicas y el secuestro de carbono (Frouz 2018; Schröder 2008), que permiten al suelo mantenerse como un sistema vivo vital, dentro de los límites del ecosistema (Visscher et al. 2024).

Por otro lado, varias investigaciones afirman que la actividad de lombrices y artrópodos está influenciada por complejas interacciones entre factores bióticos y abióticos, las propiedades del suelo, el clima, los residuos orgánicos y las variaciones espaciotemporales (Chamorro et al. 2022; Asfaw y Zewudie 2021; Tibbett et al. 2019; Castro-Huerta et al. 2015) por lo que, ésta biodiversidad es considerada como un indicador biológico de alta sensibilidad para evaluar cambios en ecosistemas naturales y áreas de producción agrícola (Sokol et al. 2022; Morrison et al. 2012; Chamorro et al. 2022).

Así mismo, se han realizado estudios sobre la caracterización, génesis, cartografía, problemática socioeconómica y posibilidades de mejoramiento de éste material endurecido en las década de los 80-90 (Noni 1993; Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997), es así que en el Ecuador se desarrolló el III Simposio Internacional de Suelos Endurecidos (Zebrowski, Quantin y Trujillo 1997). Posteriormente, se han realizado mapeos satelitales, análisis y estudios sobre el mejoramiento de las propiedades físicas mediante prácticas sustentables puntuales. Sin embargo, no se ha realizado estudios considerando la interacción y complejidad de prácticas de manejo de los agroecosistemas altoandinos y tampoco se ha cuantificado la biota en todos en los procesos de rehabilitación de suelos degradados.

En ese contexto, la presente investigación se desarrolló en dos localidades de la sierra ecuatoriana: Cacha ubicada en la provincia de Chimborazo y La Merced en la provincia de Pichincha las cuales fueron seleccionadas por presentar suelos degradados con afloramiento de cangahua y características edafoclimáticas similares; por consiguiente, propiedades físicas, químicas y biológicas restrictivas para su aprovechamiento y conservación por su dureza y baja porosidad.

De cada zona se seleccionaron dos de los manejos más representativos. Así, el manejo agroecológico integra entre sus prácticas principios ecológicos como la acumulación de materia

orgánica, diversificación funcional y cobertura vegetal y el manejo tradicional es desarrollado con prácticas empíricas que han sido adquiridas y transmitidas por generaciones, se consideró también el barbecho que es una fase de “descanso” del terreno. Cabe destacar que en Cacha los suelos se encuentran en procesos de rehabilitación entre 5-8 años, en tanto que en La Merced están por sobre los 15 años, además en esta localidad las prácticas tienen procedimientos más estructurados.

Nos planteamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la incidencia de las prácticas de manejo de suelos en la composición de la biodiversidad edáfica en agroecosistemas altoandinos? Los manejos fueron comparados con un suelo degradado como tratamiento testigo, con el objetivo de entender cuál es el proceso de re(habilitación) de la composición de la edafofauna en suelos con cangahua. En ese sentido, se prevé que la Merced presente mayor biodiversidad que Cacha en vista que su proceso de rehabilitación es más avanzado en tiempo y estructuración. Esta información servirá para la generación de recomendaciones sobre prácticas de manejo que rehabiliten la edafofauna de suelos degradados en agroecosistemas altoandinos para el establecimiento de sistemas agrícolas más productivos y regenerativos en el país.

Materiales y métodos

Área de estudio

Para el presente estudio identificamos dos zonas de estudio en los Andes ecuatorianos: Zona 1 Cacha, ubicada en la sierra central en la provincia de Chimborazo (1°43'27.5"S 78°43'13.8"W) y Zona 2 La Merced, ubicada en la provincia de Pichincha (0°16'50.3"S 78°24'30.8"W) , con altitudes entre los 2800 y 3100 msnm, una precipitación media anual de 550 mm para Cacha y 650 mm para la Merced y con una temperatura media anual de 15 C (GAD Parroquial Cacha 2023; GAD PICHINCHA 2012). Como se observa en la figura 2.1

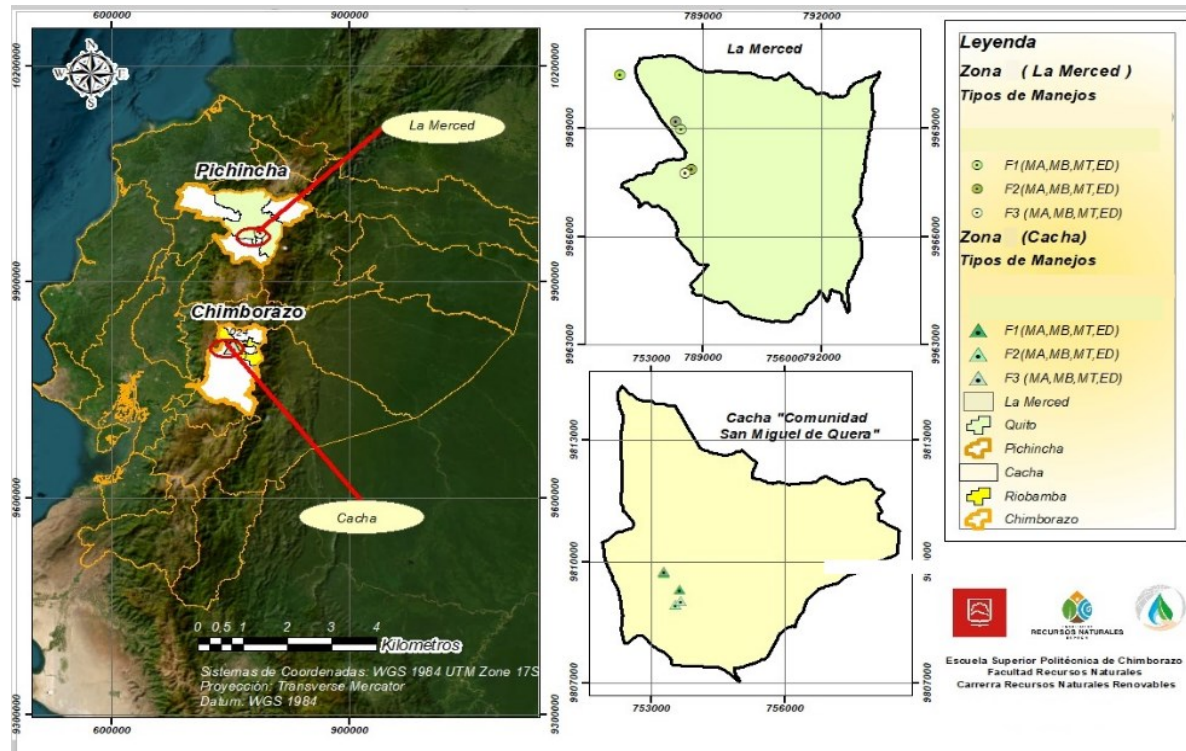


Figura 2.1. Localización de las unidades de muestreo en la sierra ecuatoriana.

El suelo de las unidades de muestreo de la parroquia La Merced presentan formaciones geológicas del Pleistoceno (17.53% de todo el territorio), los cuales se caracterizan por presentar sus flancos cubiertos por cangagua que fueron formados por la acumulación de material piroclástico, flujos de lavas y lahares, topografía irregular con pendientes que oscilan entre el 12% y el 60%. El uso de suelo en esta parroquia está dominado por los cultivos de ciclo corto con el 26,30 % del territorio y el cultivo de maíz con el 30,45 % (GAD PICHINCHA 2012), en Cacha son suelos con 5-8 años de manejo, y las prácticas son menos intensivas que en la Merced que se tiene un proceso de (re)habilitación sobre los 15 años.

Diseño del estudio

Los muestreos fueron realizados entre septiembre y octubre del año 2023, al inicio de la temporada lluviosa para las dos localidades, que es la época en la cual las poblaciones de individuos en estudio presentan picos de crecimiento (Mutai et al. 2024; de Oliveira et al. 2021). Para la determinación de la influencia de las prácticas de manejo sobre la biodiversidad de suelos en cangagua, se seleccionaron 2 tipos de manejo de agroecosistemas (unidad de muestreo): manejo agroecológico

(MA) y manejo tradicional (MT) con al menos 5 años de rehabilitación, se consideró también el barbecho (MB), los cuales se compararon con un ecosistema degradado como tratamiento de control (ED), cada unidad de muestreo mide 1000 m².

Para el manejo agroecológico (MA) el propietario del predio primeramente realiza un diagnóstico de la situación actual del suelo y así determinar y planificar las técnicas a implementarse según las investigaciones y principios agroecológicos, de ésta manera se busca generar suelos más sanos y por ende agroecosistemas más productivos (Gómez, Ríos-Orsorio y Eschenhagen 2015). Es decir, la agricultura ecológica o agroecología se basa en nuevas tecnologías que permitan llegar a una producción más sostenible, maximizando los rendimientos y al mismo tiempo conservando los recursos naturales (Nicholls et al. 2015; Gliessman 2006).

La diferencia con otros manejos radica en la integración de principios ecológicos y la interacción con disciplinas científicas para conseguir la conservación y restauración del suelo, agua y biodiversidad así, mejora la calidad del suelo mediante la incorporación de materia orgánica para el incremento de la actividad biológica del suelo y diversifica las especies en el agroecosistema para mejorar las interacciones biológicas y sinergias (Cortés, Vieli y Ibarra 2023).

Por otro lado, al manejo tradicional (MT) se lo entiende como un sistema de producción agrícola para la obtención de alimentos, desarrollado sobre la base de conocimientos y prácticas empíricas que han sido adquiridos y enriquecidos por generaciones. Estos sistemas de producción nos brindan una base de conocimientos que podemos aplicar y revalorizar para mejorar los sistemas agrícolas modernos y volverlos más resilientes (Méndez et al. 2017; Altieri et al. 2015).

Así, en las zonas altas de los Andes tradicionalmente se cultivan tubérculos y granos andinos y maíz *Zea mays* y fréjol *Phaseolus vulgaris* en las zonas bajas e interandinas (Hofstede 2023). En consecuencia, para la presente investigación se ha considerado el cultivo del maíz en asociación o rotación con alguna leguminosa (fréjol) como manejo tradicional por encontrarse en más del 30 % del territorio en las dos zonas de estudio, cabe resaltar que en este tipo de manejo el aporte de biomasa como cobertura de suelo es mínimo después de la cosecha y en varios predios inclusive se utiliza mecanización agrícola básica para la preparación del terreno.

Por último, el barbecho (MB) hace referencia al período de descanso del suelo entre cosechas, asociado a la regeneración del suelo en preparación para la siembra, por lo que no se percibe como

un momento pasivo, sino un momento imprescindible para la siguiente etapa de refuerzo activo de la cosecha (Licona y Estupiñán 2019).

Durante éste período, los nutrientes son almacenados en la biomasa de la vegetación sucesional cuando el suelo está siendo preparado y luego liberados para el nuevo ciclo de siembras, (Licona y Estupiñán 2019; Börner et al. 2007). Es una condición de suelo que se encuentra temporalmente sin cultivos, pero no completamente abandonada y sin cultivar, en varios lugares inclusive se lo cubre con una capa de materia orgánica que es generalmente residuos de la cosecha anterior o transportados de terrenos cercanos, eventualmente esta biomasa se la humedece para favorecer la descomposición (Barrios et al. 2005). Algunas de las prácticas son coincidentes en varios tipos de manejo, sin embargo, tienen sus particularidades como se puede observar en detalle en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Prácticas agrícolas observados en las dos zonas de la investigación.

PRACTICA	Manejo Agroecológico (MA)	Manejo Tradicional (MT)	Manejo Barbecho (MB)
Asociación de cultivos	Las especies son seleccionadas de acuerdo a principios ecológicos que generen sinergia y resiliencia.	Las especies han sido seleccionadas durante generaciones.	
Policultivo	Con análisis y planificación de beneficios económicos.	Orientado a obtener alimento para el hogar	
Rotación	Con cultivos específicos que buscan aumentar la productividad, satisfacer las necesidades del mercado y cuidar el suelo.	Con cultivos tradicionales del sector, buscan satisfacer la alimentación de la familia y cuidar el suelo.	

Cobertura de suelo	El suelo se lo mantiene con cobertura vegetal viva o con residuos (mulch.)	Se adiciona biomasa principalmente residuos de cosechas y podas.
Abonos orgánicos	Son realizados con materiales de la finca y aplicados en forma de humus, compost, biol (abono orgánico líquido), en algunos casos se incorporan también microorganismos.	Se utiliza en algunos casos el estiércol de los animales de la finca.
Abonos verdes	Se incorpora leguminosas y gramíneas para mejorar la productividad del suelo.	
Incorporación de materia orgánica	Es directamente incorporada en el terreno mediante abonos orgánicos.	Se realiza directamente en el terreno dejando que los restos de la cosecha anterior se descomponga
Barreras vivas	Son implementadas principalmente para la generación de microclimas, control biológico y polinización	Se utilizan para delimitación de fincas.
Agroforestería	Son más sistemáticos, las especies seleccionadas tienen fines específicos para microclimas, plagas,	Se busca optimizar los espacios colocando arbustos y árboles frutales

	según las demanda del mercado.	
Incorporación de microorganismos	Se pueden utilizar microorganismos de montaña, trichoderma u otros.	
Selección y conservación de semillas		Se seleccionan y se almacenan para obtener las semillas que serán utilizadas en la siguiente siembra.
Uso eficiente del agua	Se utilizan métodos de riego por goteo y aspersión.	
Gestión de plagas	Se utilizan trampas, depredadores y especies vegetales como controladores biológicos.	
Análisis de suelo	Se hace un seguimiento continuo de la calidad y niveles de fertilidad del suelo.	
Épocas de siembra		Se considera la previsión de lluvias y las fases lunares para establecer las épocas de siembra.
Especies vegetales más importantes	Hortalizas de ciclo corto: Brócoli <i>Brassica oleracea</i> , Acelga <i>Beta vulgaris</i> ,	Maiz <i>Zea mays</i> Fréjol <i>Phaseolus vulgaris</i> Restos de cosechas de Maiz <i>Zea mays</i> Fréjol <i>Phaseolus vulgaris</i> , restos de

Lechuga <i>Lactuca sativa</i> ,	podas de árboles
Frejol <i>Phaseolus vulgaris</i>	frutales Limón:
Remolacha <i>Beta vulgaris</i>	<i>Citrus limon</i>
Arboles	Durazno: <i>Prunus</i>
Tomate de árbol <i>Solanum</i>	<i>persica</i>
<i>betaceum</i>	Aguacate: <i>Persea</i>
Guayaba <i>Psidium guajava</i>	<i>americana</i>
Aliso <i>Alnus acuminata</i>	
Retama <i>Spartium junceum</i>	
Plantas medicinales	
Manzanilla <i>Matricaria</i>	
<i>chamomilla</i>	
Cedrón <i>Aloysia citriodora</i>	

Metodología

Evaluación de la macrofauna (lombrices)

Cuadrantes para conteo de lombrices (Monolito).

Esta metodología facilita la cuantificación de la diversidad y abundancia de la biota edáfica mayor a 2 mm, para la presente investigación se consideró solamente la presencia de lombrices debido a su papel en los procesos ecosistémicos, a su sensibilidad a las condiciones ambientales y a los efectos de los cambios en el uso del suelo y de las prácticas de manejo en agroecosistemas templados (Moreira, Huising y Bignell 2008; Stroud 2019).

Para la evaluación de la macrofauna (lombrices) se utilizó la metodología del monolito, en la cual se procedió a colocar un cuadrante de 25x25 cm aleatoriamente en tres puntos de cada unidad de muestreo, luego se excavó un hoyo con una profundidad de 25 cm, y se procedió a contar en el cubo de suelo resultante la cantidad de lombrices (Moreira, Huising y Bignell 2008; Stroud 2019).

Evaluación de los artrópodos del suelo.

Para la evaluación de los artrópodos usamos *Trampas Berlese-Tullgren* que permite extraer los organismos de vida libre en muestras de suelo y hojarasca. El principio se basa en un embudo cubierto interiormente con una malla plástica de 2 mm, donde fueron colocadas las muestras compuestas de suelo (800 g de cada unidad de muestreo) tomadas con barreno. En la parte inferior del embudo se coloca un frasco de vidrio receptor con alcohol al 75 % y en la parte superior una lámpara de 25 vatios de luz amarilla. La muestra fue tapada con hojarasca y se la dejó reposar durante 72 horas.

Los organismos presentes en las muestras respondieron a la reducción de la humedad causada por el aumento de la temperatura en el suelo deslizándose a través de la malla hacia el frasco (Moreira, Huising y Bignell 2008). Se vertió el contenido de los frascos de alcohol en cajas petri y se anotó el número y tipo de organismos con ayuda del estereoscopio y para la identificación se utilizaron las claves taxonómicas hasta el nivel de orden según el libro de “Borror and DeLongs Introduction to the Study Of Insects” del autor Charles A. Triplehorn y Norman E. Jhonson (Johnson, N., & Triplehorn 2004).

Cuantificación de la microbiomasa bacterial

Para determinar la microbiomasa bacterial de suelo, se midió la densidad de hongos y bacterias que permanecen suspendidos en una solución mediante el aplicativo microbiometer. La aplicación mide la intensidad del color que es comparado con un fondo de una tarjeta de prueba, de ésta manera el color generado por las gotas muestreadas mide la densidad de células microbianas en la muestra en virtud del croma que adoptan en la tarjeta, que es interpretada como la microbiomasa de hongos y bacterias (Nickens, Ader y Walker 2024; Marais y Booyse 2024).

Para la presente investigación se seleccionaron metodologías con rigor académico, accesible y replicables, de tal manera que sean utilizadas por los practicantes de la agricultura que es el enfoque del proyecto en el cual fue desarrollado este estudio. Conocemos que existen métodos mucho más precisos en sus mediciones y evaluaciones, pero al mismo tiempo presentan una alta complejidad y costos elevados, razón por la cual no fueron considerados.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico realizamos 3 repeticiones por cada manejo y por zona, de la misma manera para el suelo degradado, con un total de 24 unidades de muestreo, como presenta la Tabla 2.2. Las variables independientes fueron los tipos de manejo y las variables dependientes la abundancia y diversidad de lombrices y artrópodos y la cantidad de hongos y bacterias existentes en los suelos de los agroecosistemas. Con los datos obtenidos en el estudio, se realizaron modelos lineales generalizados con distribución de Poisson analizando el efecto del manejo y las zonas sobre: a) la abundancia total de artrópodos, b) la abundancia de artrópodos detritívoros, la abundancia de artrópodos depredadores, y la abundancia de lombrices. Consideramos también la diversidad de grupos a nivel de orden de la mesofauna encontrada en los embudos Berlesse. Para determinar el efecto del tipo de manejo y la zona sobre la microbiomasa de hongos y bacterias y sobre la relación hongos/bacterias, se realizaron modelos lineales luego de la transformación logarítmica de los datos. Para evaluar el efecto del tipo de manejo y de la zona sobre la composición de la fauna (número de individuos por orden en cada finca), se realizó un Análisis de Varianza Multivariado Permutacional (PERMANOVA) (999 permutaciones), utilizando las matrices de distancia de Bray-Curtis en el programa PCOrd (McCune & Mefford 2018). Para ilustrar las diferencias en la composición de la mesofauna entre los diferentes tipos de manejo en cada zona, se realizó un análisis de coordenadas principales (PCoA), utilizando la matriz de distancia de Bray-Curtis en el programa PCOrd (McCune & Mefford 2018).

Tabla 2.2 Número de unidades de muestreo (U.M) en las zonas de estudio

	Manejo Agroecológico (MA)	Manejo Tradicional (MT)	Barbecho (MB)	Degradado (ED)
Zona 1 (Z1)	3 Manejos	3 Manejos	3 Manejos	3 Manejos
Cacha	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones
Zona 2 (Z2)	3 Manejos	3 Manejos	3 Manejos	3 Manejos
La Merced	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones
Total	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.
Total unidades				24 U.M.

Resultados

Evaluación de la macrofauna (lombrices) en diferentes tipos de manejo.

La cantidad de lombrices fue afectada por los tipos de manejo estudiados ($\chi^2 = 96,4$, $P < 0,001$) y se observó una interacción significativa entre tratamientos y zonas ($\chi^2 = 59,7$, $P < 0,001$), como se observa en la Figura 2.2 En Cacha, la abundancia promedio de lombrices fue mayor en el manejo agroecológico y tradicional que en el Barbecho y el ecosistema degradado. En La Merced, en cambio, la abundancia fue mayor en el Barbecho que en el manejo tradicional y agroecológico y mayor en este último que en el ecosistema degradado.

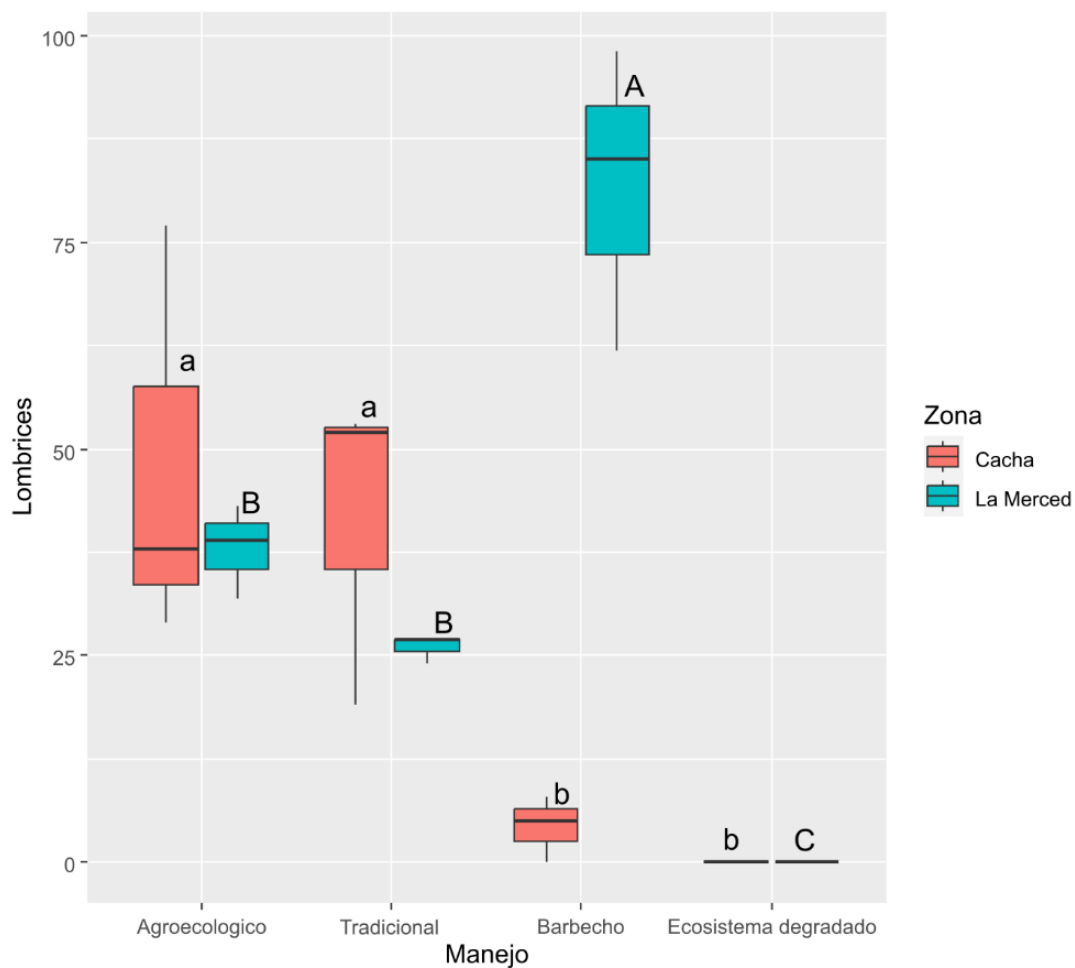


Figura 2.2. Abundancia de las lombrices en los manejos y zonas. Hubo interacción entre las zonas y tratamientos, por lo que se analizó cada una de las dos zonas por separado. Las letras minúsculas sobre los gráficos de caja representan las diferencias en los valores medios entre tratamientos en Cacha, mientras que las letras mayúsculas representan las diferencias en La Merced.

Evaluación de los artrópodos en diferentes tipos de manejo.

El total de artrópodos fue diferente entre los tipos de manejo estudiados ($\chi^2 = 27,5$, $P < 0,001$); sin embargo, también hubo una interacción significativa entre tratamientos y zonas ($\chi^2 = 15,1$, $P = 0,002$), como se observa en la Figura 2.3. En Cacha se observó que en promedio el número total de artrópodos fue mayor en el manejo agroecológico y barbecho que en el ecosistema degradado. En La Merced, la abundancia fue mayor en el manejo Barbecho que en el manejo agroecológico y mayor en el manejo agroecológico que en el manejo tradicional. En los tres tipos de manejo hubo mayor abundancia de artrópodos en los diferentes manejos que en el ecosistema degradado.

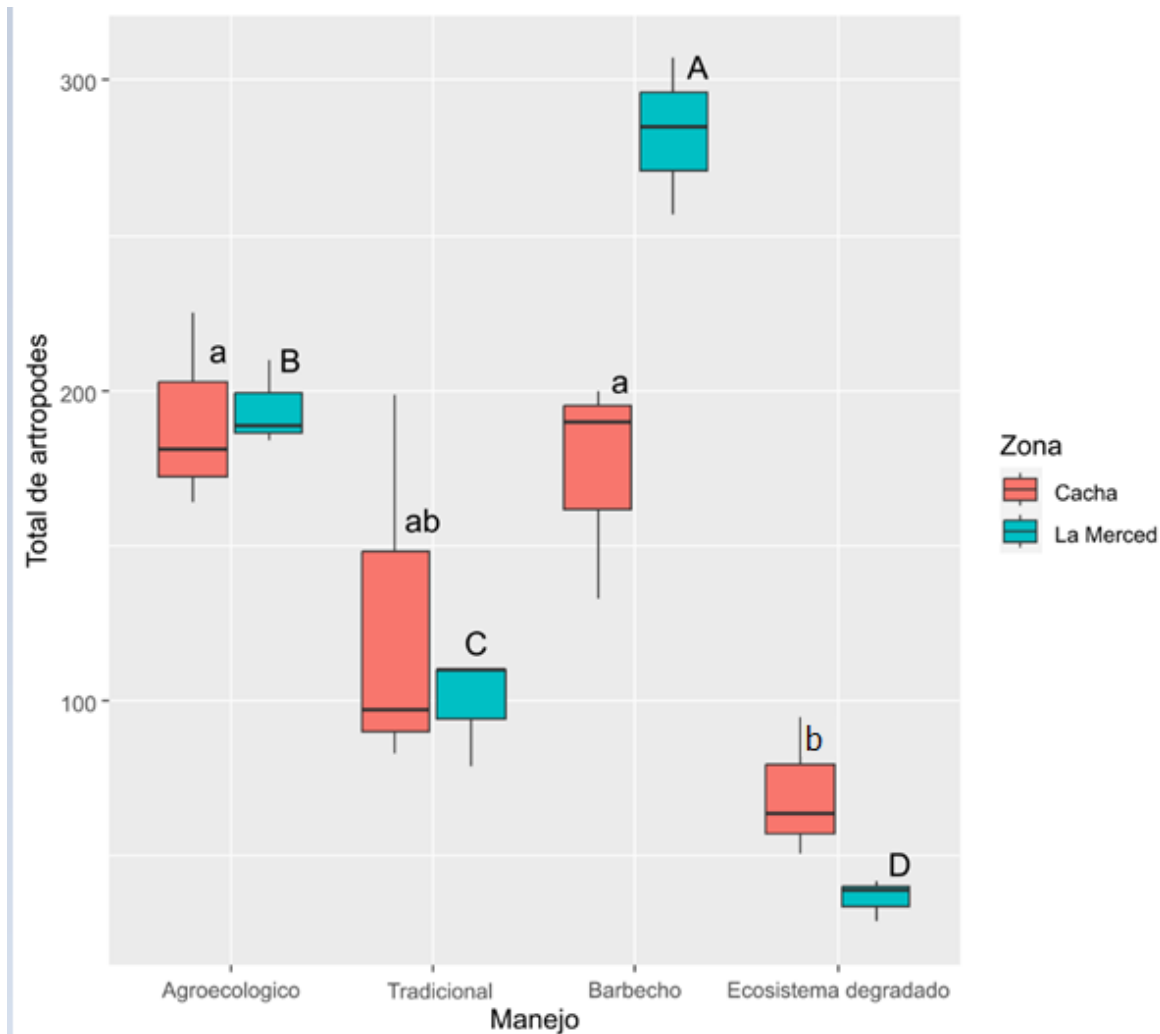


Figura 2.3. Abundancia total de artrópodos por manejos y zonas, existiendo interacción entre estos dos componentes. Las letras minúsculas sobre los gráficos de caja representan las diferencias en los valores medios entre tratamientos en Cacha, mientras que las letras mayúsculas representan las diferencias en La Merced.

Para el número de órdenes de artrópodos, hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($\chi^2 = 98,6$, $P < 0,001$) y también entre zonas ($\chi^2 = 103,8$, $P < 0,001$). No se observó interacción entre tratamientos y zonas ($\chi^2 = 1,2$, $P = 0,75$). En las dos zonas había menor número de órdenes en el ecosistema degradado que en los demás tratamientos, como se aprecia en la Figura 2.4.

La abundancia según el orden se diferenció entre los diferentes manejos, así los órdenes más abundantes en Cacha para el MA fueron del 30 % de Dípteros, para el MB el 27 % de Mesostigmata y el 31 % del orden Oribatida. En la Merced se identificaron 144 individuos del orden Mesostigmata que representa el 25 % en el MA, un 38 % del orden Oribatida para el MB, el 33 % de la orden himenóptera para el MT.

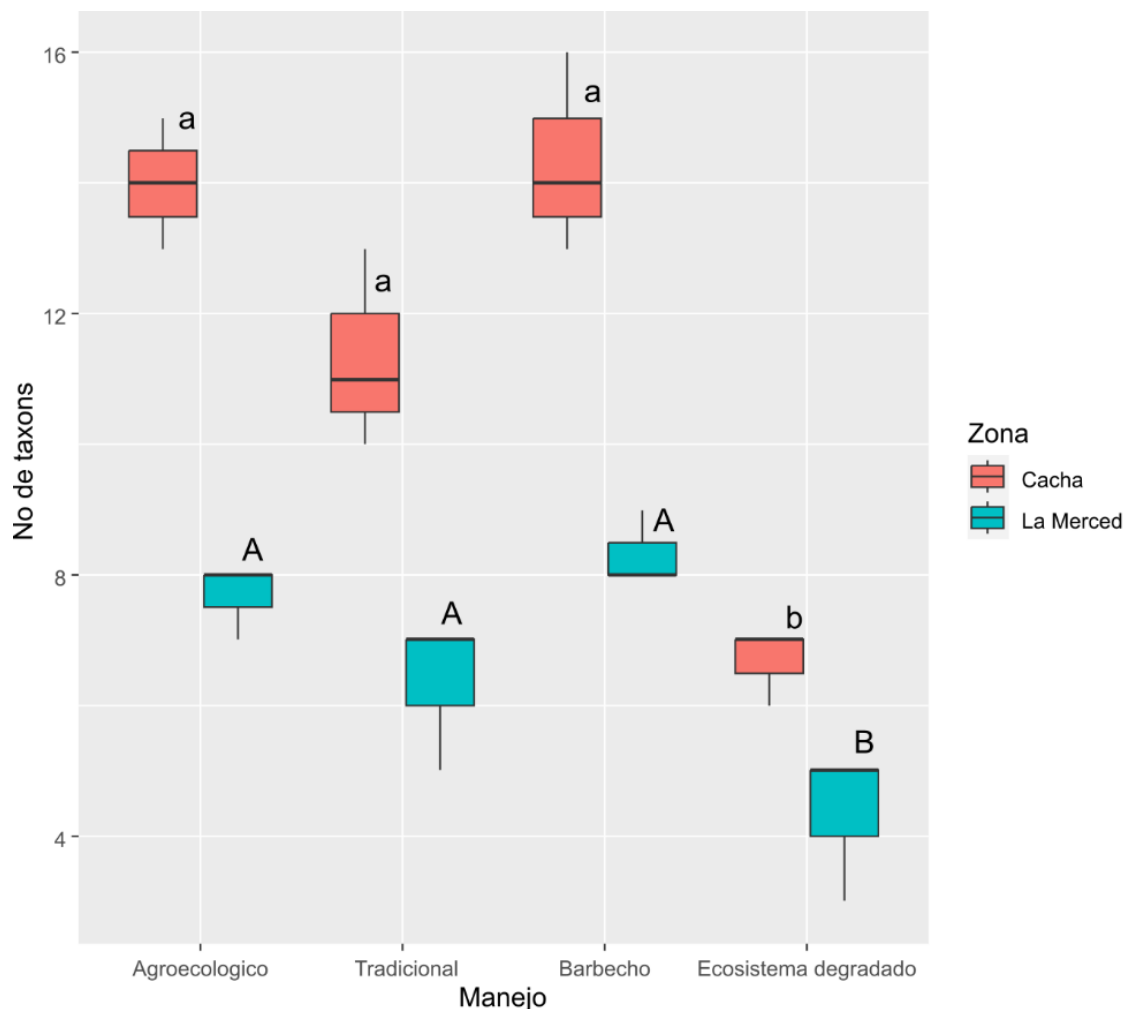


Figura 2.4. Número de órdenes por tratamiento en las dos zonas, no se observaron interacción entre estos dos componentes, sin embargo, todos los tratamientos difieren del suelo degradado, es decir se está rehabilitando la composición edáfica de los suelos a nivel de órdenes.

En lo referente a los roles funcionales, los detritívoros y depredadores fueron los más abundantes para las dos zonas, mientras que los micófagos y parasitoides fueron los que se encontraron en menor proporción. Como se observa en la Figura 2.5 se observó una interacción entre zonas y manejos ($\chi^2 = 66,7$, $P < 0,001$) sobre a abundancia de los detritívoros. En Cacha la abundancia de detritívoros fué mayor en el manejo agroecológico que en el ecosistema degradado. En el mismo sentido, en la Merced, la abundancia de detritívoros fué mayor en el manejo Barbecho, luego en el manejo agroecológico y luego el tradicional. En todos los tipos de manejo hubo más detritívoros que en el ecosistema degradado.

Para el grupo funcional de los depredadores tuvo interacción entre los manejos y zonas ($\chi^2 = 8,9$, $P = 0,029$). En Cacha había mas depredadores en el manejo agroecológico y en el Barbecho que en el ecosistema degradado. En la Merced, se observaron más depredadores en el manejo agroecológico y en el Barbecho que el manejo tradicional, y en todos los manejo se observaron más depredadores que en el ecosistema degradado, como se observa en la Figura 2.6.

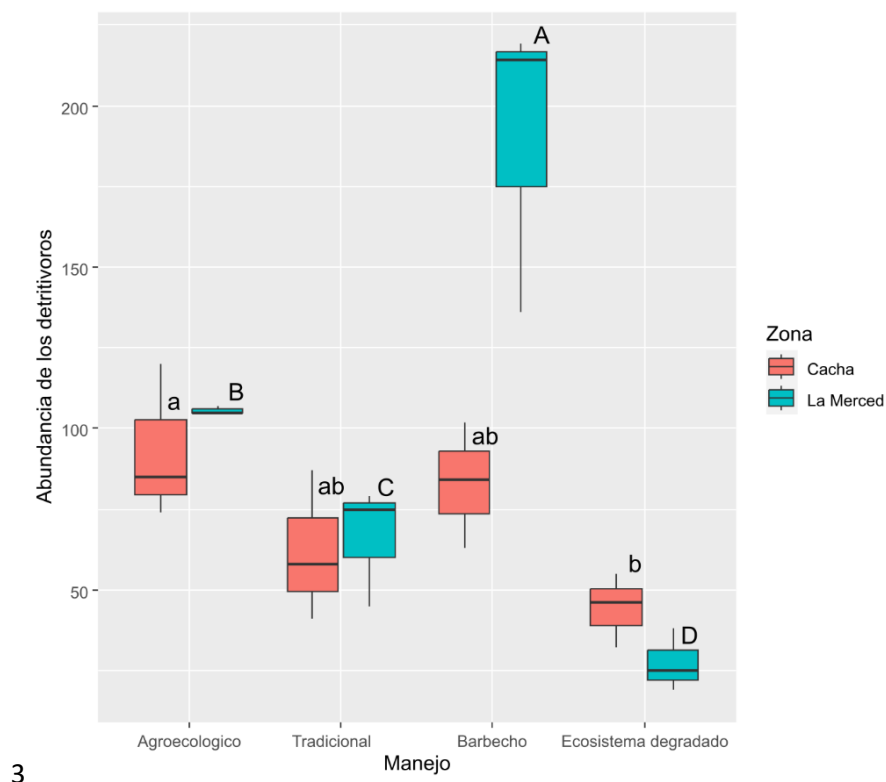


Figura 2.5. Abundancia de los detritívoros por manejos y zonas, existiendo interacción entre estos dos componentes. Las letras minúsculas sobre los gráficos de caja representan las diferencias en los valores medios entre tratamientos en Cacha, mientras que las letras mayúsculas representan las diferencias en La Merced.

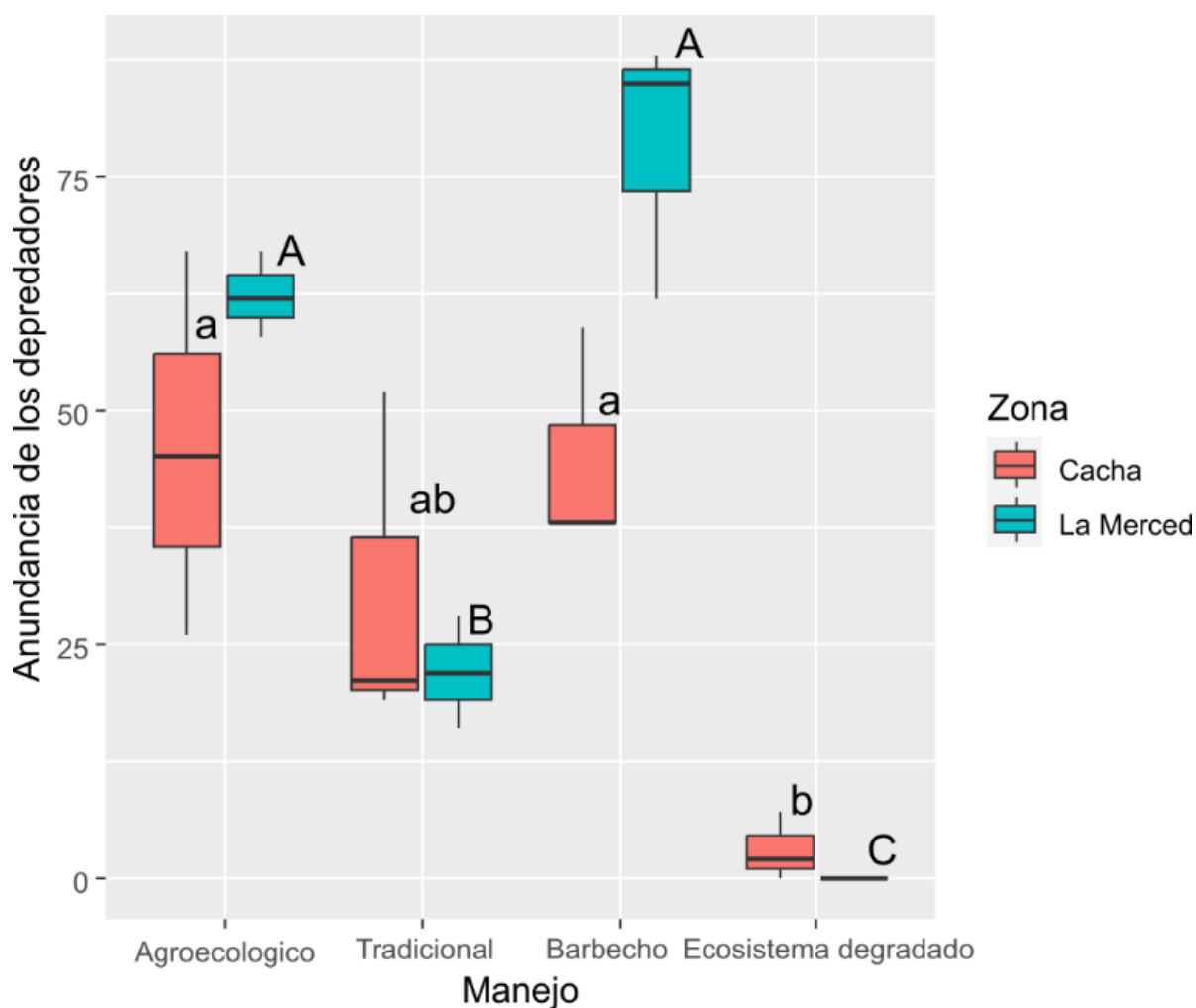


Figura 2.6. Abundancia de los depredadores por manejos y zonas, existiendo interacción entre estos dos componentes. Las letras minúsculas sobre los gráficos de caja representan las diferencias en los valores medios entre tratamientos en Cacha, mientras que las letras mayúsculas representan las diferencias en La Merced.

Al realizar el análisis Permanova (Permutational Multivariate Analysis of Variance), se observaron diferencias en la composición de la fauna (número de individuos por orden) entre tratamientos ($F = 6,1$, $GL = 3$, 16 , $P < 0,001$), zonas ($F = 19,4$, $GL = 1$, 16 , $P < 0.001$), y también hubo una interacción entre zonas y tratamientos ($F = 4,7$, $GL = 3$, 16 , $P < 0.001$) ya que el efecto del tratamiento fue más fuerte en Merced que en Cacha, especialmente cuando se comparó el ecosistema degradado con los tratamientos de manejo. Estas diferencias pueden visualizarse mejor en el biplot resultante del Análisis de Coordenadas Principales (PcoA) (Figura 2.7).

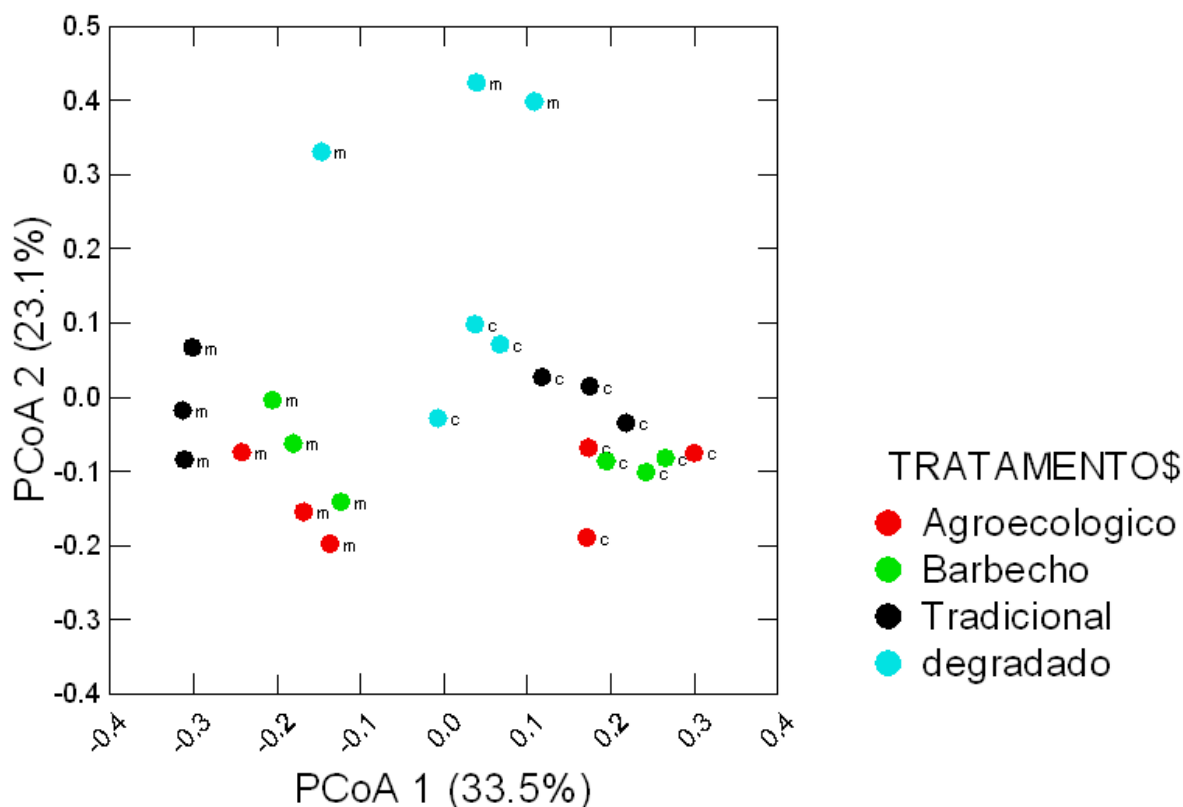


Figura 2.7. PCoA (Análisis de Coordenadas Principales) mostrando las diferencias en la composición de artrópodos entre los tratamientos y las zonas Cacha (c) y La Merced (m).

Evaluación de la microbiomasa de hongos y bacterias en diferentes tipos de manejo.

El contenido de biomasa de hongos y bacterias varió tanto entre los tipos de manejo ($F_{3,16} = 3,76$, $P = 0,032$) como entre las zonas de estudio ($F_{1,16} = 25,6$, $P < 0,001$), sin que se observara interacción entre estos dos factores ($F_{3,16} = 1,45$, $P = 0,264$). En general, la biomasa de hongos y bacterias fue mayor en los suelos de La Merced que en los de Cacha. Además, se observó que la biomasa de hongos y bacterias fue mayor en el manejo tradicional que en el suelo degradado (Figura 2.8).

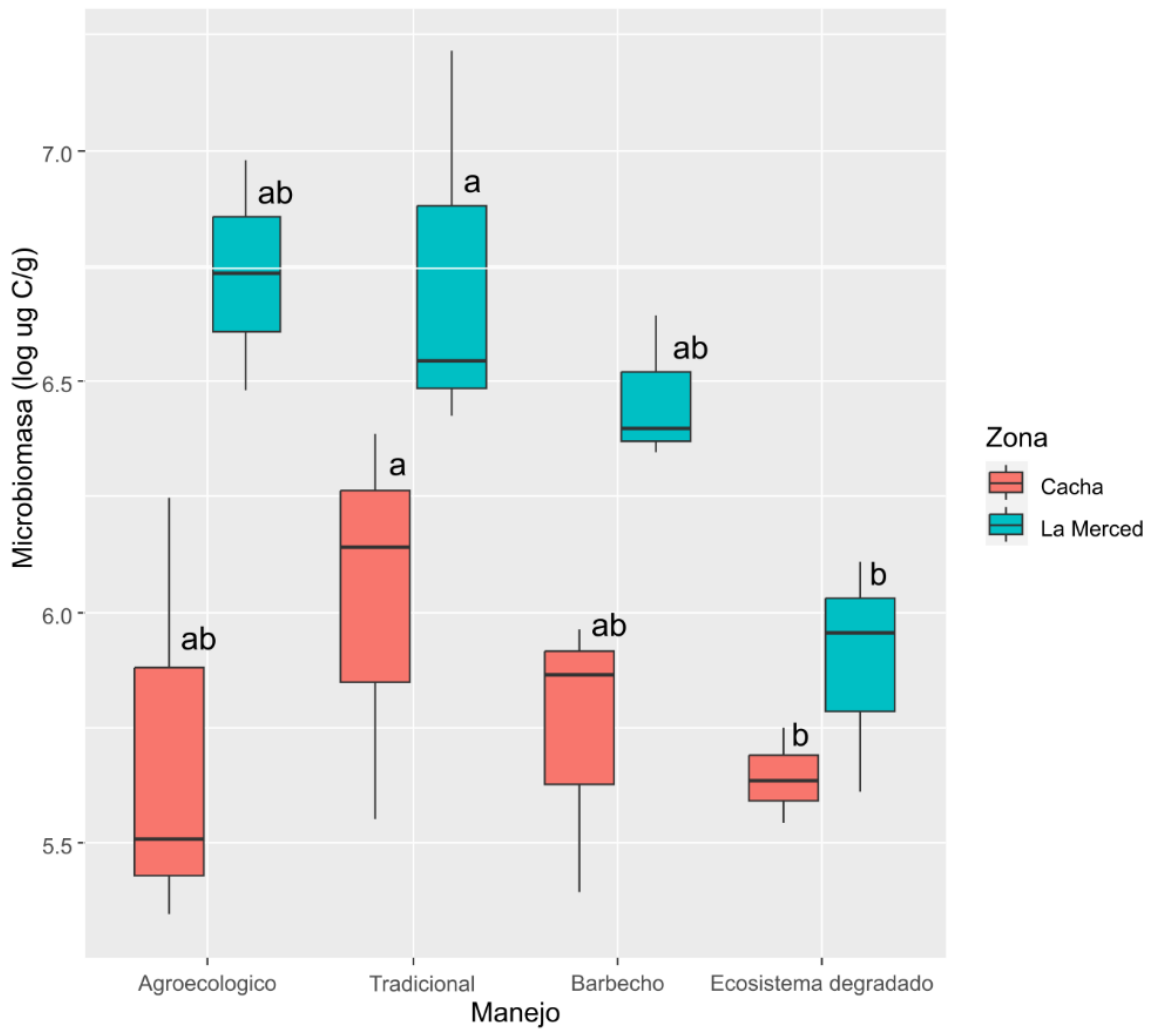


Figura 2.8. Microbiomasa de los tipos de manejo (datos transformados en log).

Del mismo modo, encontramos una mayor proporción de hongos: bacterias en los suelos de La Merced que en los de Cacha ($F_{1,16} = 18,38$, $P < 0,001$), y una mayor proporción en el manejo tradicional que en el suelo degradado ($F_{3,16} = 3,53$, $P = 0,038$) (Fig. 2-9).

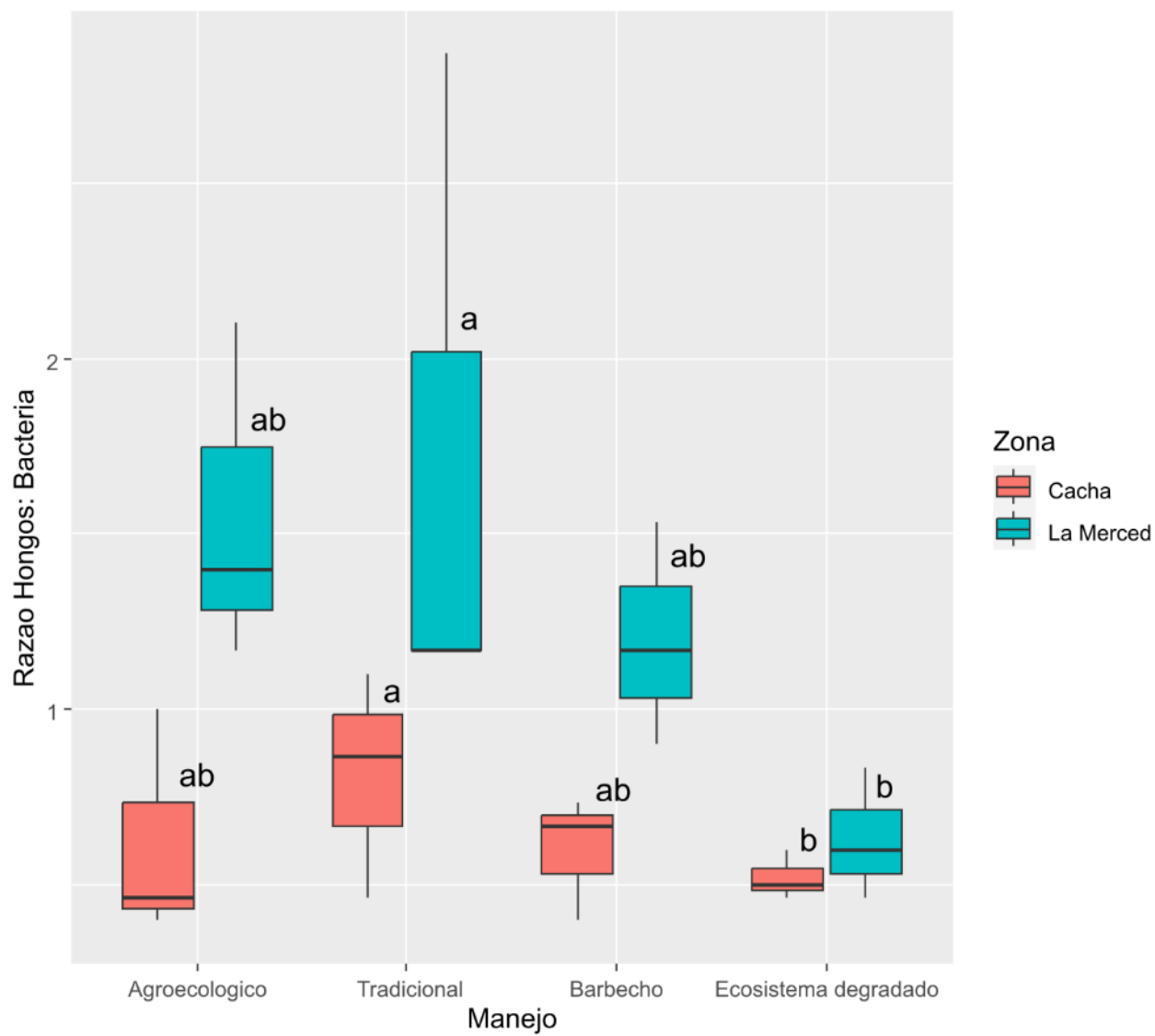


Figura 2.9. Razón Hongo:Bacteria (datos transformados en log)

Discusión

En el análisis de los resultados, hay una clara diferencia en la abundancia de la lombrices y artrópodos entre Cacha y La Merced. Así, en Cacha no hubo diferencias entre los manejos agroecológico, tradicional y barbecho, pero estos fueron diferentes del ecosistema degradado, en el sentido de que había más biodiversidad edáfica en ellos que en el ecosistema degradado.

Analizando por zonas, en la Merced, en general, se observó mayor abundancia de lombrices y artrópodos en el manejo agroecológico que en el manejo tradicional, lo que se podría explicar por

el barbecho que se realiza en éste manejo que tiene también un alto contenido de biodiversidad edáfica.

Para las bacterias y los hongos, todos los manejos fueron iguales (aunque superiores al ecosistema degradado) y esto ocurrió en las dos zonas. No hubo interacción entre las zonas y manejo. Por lo tanto, en este caso, el barbecho no es importante para explicar las diferencias. Comparando entre zonas, en la Merced se observó más microbiomasa y una mayor proporción de hongos:bacterias que en Cacha, que podría deberse al tiempo de rehabilitación de los suelos degradados, siendo en la Merced 15 años y en Cacha 5 años.

Evaluación de la macrofauna (lombrices) en diferentes tipos de manejo y ecosistemas

En el estudio se observaron interacciones entre las zonas y los tratamientos (manejos) en lo que se refiere a la composición macrofauna (lombrices), es decir el efecto de los manejos fue diferente entre zonas. En general, el mayor número de individuos se encontró en los manejos agroecológico y barbecho de la Merced en los cuales se desarrollan prácticas ecológicas como la incorporación de material orgánico, diversificación de especies funcionales y cobertura de suelo que generan temperatura, humedad, provisión de hojarasca y fuentes de alimentos para las lombrices (Licona y Estupiñán 2019; Gliessman et al. 2007; Barrios et al. 2006).

El barbecho es una práctica de descanso del suelo y/o de rotación de cultivos que tiene diferentes tipologías según su composición y tiempo, así puede identificarse barbecho de verano, barbecho mejorado, barbecho sectorizado y barbecho integrado con cultivos (Licona y Estupiñán 2019).

En La Merced practican el barbecho mejorado, en donde se incorpora abundante biomasa vegetal (hasta 40 cm sobre el suelo) proveniente de los residuos de cosechas del mismo predio, e inclusive son transportados de fincas cercanas y se lo realiza con más frecuencia después del manejo agroecológico. En tanto que, en Cacha el barbecho es sinónimo de abandono del terreno, en donde no se realiza ninguna intervención hasta la próxima siembra, inclusive se observó en algunos predios el suelo descubierto y sin cobertura vegetal en este tipo de manejo. En un estudio implementado en Colombia compararon la abundancia de lombrices entre barbechos mejorados (30%) y tradicionales (15%) (Barrios et al. 2005), esto se debe a la acumulación de biomasa y hojarasca. En otro estudio se encontraron más lombrices en un agroecosistema caracterizado por la presencia de cobertura vegetal y hojarasca elementos claves para el hábitat de las lombrices que en un monocultivo con labranza y uso de agroquímicos Mamabolo et al. (2024).

Otros factores como el tipo de labranza son cruciales para las lombrices ya que el laboreo excesivo y profundo rompe las estructuras biogénicas de las lombrices, matan sus huevos o juveniles y exponen a los adultos a condiciones adversas, sobre todo a las lombrices epigeas que viven en la superficie del suelo (Lavelle et al. 2022; De León-González, Fuentes-Ponce y Payán-Zelaya 2011), en el caso del manejo agroecológico y barbecho no se realiza remociones ni perturbaciones en la capa edáfica lo que ha favorecido que sean los manejos con el mayor número de lombrices. Así, Chan y Domínguez et al. (2024; 2001) encontraron que la biomasa de lombrices fue 8 veces mayor en granjas de producción agroecológica que en las de producción convencional y más abundante que algunos bosques inclusive.

Evaluación de los artrópodos en diferentes tipos de manejo y ecosistemas.

Se observaron interacciones entre las zonas y los tratamientos, es decir, los manejos afectan la composición de los artrópodos, la mayor cantidad de individuos (a nivel de órdenes) se encontraron en los manejos agroecológicos y barbecho de la Merced. Su alta presencia puede deberse a las prácticas de cobertura y baja perturbación del suelo que aumentan la materia orgánica y la biodiversidad, creando un ambiente favorable para estos individuos (LAVELLE et al. 2022) .

En lo referente a los órdenes, la presencia y abundancia de Dípteros en todos los tipos de manejo principalmente en la zona de Cacha, pueden estar influenciada por una serie de factores que van desde la composición del suelo (cangahua en proceso de rehabilitación) hasta las prácticas agrícolas empleadas. Estas se caracterizan por no remover el suelo (barbecho y agroecológico), coincidiendo con Davis et al, (2023) el cual menciona que, el orden Díptera es más abundante en ecosistemas no perturbados.

Otro orden que se encuentra en cantidades abundantes principalmente en el manejo agroecológico y barbecho es el Mesostigmata, debido a que no se realizan disturbios en el suelo durante los períodos de descanso, favoreciendo la acumulación de materia orgánica y organismos del suelo. Según Seniczak et al., y Walter & Proctor (2013; 2022) este orden es muy importante debido a su potencial como agente de control biológico de plagas y su presencia puede estar correlacionada con la abundancia de sus presas potenciales.

En el mismo sentido, Bolger et al., (2018) encontraron que éstos ácaros son esenciales para mantener la salud del suelo debido a su diversidad y funciones ecológicas. Su presencia puede

deberse a las prácticas que aumentan la materia orgánica y la biodiversidad, creando un ambiente favorable para estos depredadores.

De modo similar, el orden Oribátida fue abundante principalmente en el barbecho de la Merced. George et al y Seniczak et al (2022; 2017) mencionan que, son indicadores de un suelo sano y que se desarrollan en ecosistemas poco alterados, característica de éste tipo de agroecosistemas, principalmente el barbecho que es adicionado hasta 40 cm de residuos de cosechas. En consecuencia en éste tipo de manejo, los Oribátidos se benefician de los altos niveles de materia orgánica y la baja alteración del suelo, lo que promueve su actividad y abundancia (Walter y Proctor 2013) en relación a los otros manejos.

En lo referente a los roles funcionales de los artrópodos, los más abundantes fueron los detritívoros, que son típicos de suelos con materia orgánica en descomposición (Amani et al. 2020). Así, Coq et al, (2022) menciona la importancia de los detritívoros en el reciclaje de nutrientes y en la mejora de la estructura del suelo, lo que es esencial para la sostenibilidad de los agroecosistemas de las zonas de estudio.

Con la misma argumentación, el segundo grupo más abundante fueron los depredadores, los cuales indican un equilibrio en la cadena trófica del suelo y un control biológico efectivo de las poblaciones de herbívoros y otros organismos del suelo. Específicamente en los manejo agroecológico y barbecho la presencia de recursos más diversos tanto de residuos de cosechas como cultivos diversificados podrían aumentar la aptitud y abundancia de este grupo funcional (Duyck et al. 2011). Así Morín (2011) destaca que los depredadores juegan un papel crucial en la regulación de la comunidad microbiana del suelo, lo que contribuye a la estabilidad del ecosistema del suelo. Además, cabe resaltar que tanto los detritívoros como depredadores tuvieron interacciones entre zonas y entre manejos, siendo más abundantes en el manejo barbecho de la Merced por las prácticas realizadas en el mismo que incrementa las poblaciones de estos grupos funcionales que descomponen la materia orgánica y actúan como controladores biológicos entre sus principales funciones (Duyck et al. 2011; Coq et al. 2022)

Por otro lado, los grupos funcionales menos abundantes en las dos zonas fueron los micófagos y parasitoides, lo que sugiere una limitada disponibilidad de hongos en estos suelos. Menta & Remelli y Patterson et al (2020; 2019) mencionan la importancia de los micófagos para el ciclo de nutrientes, pero su baja abundancia indica posibles limitaciones en la disponibilidad de hongos

como recurso alimenticio. Los suelos de estos agroecosistemas se caracterizan por estar poblados mayormente por bacterias por ser ecosistemas degradados que se encuentran en proceso de rehabilitación.

En lo referente a la baja población de parasitoides probablemente se debe a que de acuerdo a la estructura del agroecosistemas estos prefieren vivir en los arbustos y árboles que en la plantas arvenses por lo que depende de la complejidad del agroecosistema, esto sobre todo en la Merced donde hay una gran diversidad de flores, arbustos y árboles dentro del sistema productivo (Rosas-Ramos et al. 2020; Patterson, Sanderson y Eyre 2019; Marino y Landis 1996).

Al realizar el Análisis de Coordenadas Principales (PcoA) en Cacha se observó que los tres manejos y el suelo degradado que es el control del estudio se encuentran agrupados y con poca distancia entre sí, los suelos estudiados de ésta zona tienen entre 5 y 8 años de rehabilitación con las diferentes prácticas, por lo que no se observa la incidencia sobre la rehabilitación de la composición de artrópodos. Por otro lado, en la Merced los manejos están distanciados del tratamiento control (suelo degradado) posiblemente porque se encuentran en un proceso de rehabilitación desde hace 15 años, además se observó que las prácticas en ésta zona son más metódicas y con una mejor aplicación que en Cacha. Este análisis coincide con Mutio et al (2023) quienes encontraron que en ecosistemas semiáridos las medidas de rehabilitación mejoran la calidad del suelo y las funciones del ecosistema a partir del quinto año de intervención.

Evaluación de la microbiomasa de hongos y bacterias en diferentes tipos de manejo.

Los resultados de este estudio revelan que la biomasa microbiana tanto fúngica como bacteriana, así como la razón hongos : bacterias (H:B), varía significativamente entre zonas y tipos de manejo, aunque no se evidenció una interacción estadísticamente significativa entre estos factores. Específicamente, se observó una mayor biomasa microbiana total y una mayor proporción de hongos respecto a bacterias en los suelos de La Merced, en comparación con los de Cacha, lo cual sugiere diferencias en las condiciones edáficas y el manejo del suelo.

La mayor biomasa microbiana observada en La Merced podría estar asociada a una mejor calidad del suelo, reflejada posiblemente en una mayor disponibilidad de materia orgánica, un pH más favorable y un mayor tiempo de rehabilitación (15 años), factores ampliamente documentados y determinantes de la actividad de las comunidades microbianas del suelo (Lauber et al., 2008; Fierer, 2017). Además, otros factores que podrían influir son las condiciones climáticas locales

como la biodiversidad, el régimen de humedad y los tipos de manejo sistemáticos que podrían estar generando microambientes que favorecen el desarrollo de ciertos grupos funcionales de microorganismos como se menciona en la literatura científica (Bardgett & van der Putten, 2014).

La ausencia de diferencias significativas en la microbiomasa y en la razón H:B entre los manejos agroecológico, barbecho y tradicional puede explicarse por varios factores. Primero, es posible que estos tres tipos de manejo, aunque diferenciados conceptualmente, compartan ciertas características estructurales y funcionales importantes para la microbiota del suelo. Por ejemplo, tanto el manejo agroecológico como el barbecho natural pueden promover la cobertura vegetal, el retorno de residuos orgánicos y una menor perturbación del suelo, todos ellos factores que sustentan comunidades microbianas diversas y estables (García-Orenes et al., 2013; Lori et al., 2017).

En contraste, el suelo degradado, al carecer de cobertura vegetal permanente y estar expuesto a procesos intensos de erosión, compactación y empobrecimiento orgánico, presenta condiciones adversas para la actividad microbiana, como baja disponibilidad de carbono y alteraciones en la estructura edáfica (Wall et al., 2015; Bünemann et al., 2018). Estas condiciones desfavorables afectan particularmente a los hongos, que requieren redes miceliares estables y un suelo estructurado para desarrollarse, lo que también explicaría la reducción significativa en la razón H:B en el ecosistema degradado frente a los otros ecosistemas (Strickland & Rousk, 2010).

Finalmente, desde una perspectiva temporal, la microbiota del suelo responde tanto a factores inmediatos como a factores ecológicos de largo plazo. Es posible que el tiempo transcurrido desde la implementación de los manejos en estudio no haya sido suficiente para provocar cambios detectables en la comunidad microbiana, especialmente si la transición es reciente (Allison & Martiny, 2008; Jangid et al., 2011), principalmente en Cacha que no se observaron diferencias entre manejos.

Conclusiones e implicaciones.

Diversos estudios afirman que, la composición de la biodiversidad edáfica influye directamente en la rehabilitación de los suelos degradados mejorando la calidad, salud del suelo y todos los servicios ecosistémicos asociados, lo que influye directamente en la población que vive sobre suelos con cangahua que son principalmente productores agrícolas familiares con un alto nivel de vulnerabilidad frente a la degradación de los suelos y a sus consecuentes afectaciones socio-

ecológicas. Por lo que, nos planteamos como pregunta de investigación ¿Cuál es la incidencia de las prácticas de manejo de suelos en la composición de la biodiversidad edáfica en agroecosistemas altoandinos?, con el fin de entender qué prácticas pueden ser más eficientes en la rehabilitación de este material endurecido.

En ese contexto y con los hallazgos de éste estudio, al observar que la composición de lombrices y artrópodos de los manejos agroecológico, tradicional y barbecho fueron diferentes del ecosistema degradado (control) en las dos zonas de estudio concluimos que, es posible (re)habilitar la composición edáfica de suelos en cangahua, debido a las funciones y servicios ecosistémicos asociados a la biodiversidad que generan estos manejos.

Así, en la Merced en general, se observó mayor abundancia de lombrices y artrópodos en el manejo agroecológico que en el manejo tradicional, debido principalmente al manejo barbecho que se realiza en el manejo agroecológico, concluyendo que, al integrar el manejo agroecológico y barbecho “mejorado” muestran una alta efectividad en la rehabilitación biológica del suelo, con un incremento significativo en la abundancia y diversidad de lombrices, artrópodos y detritívoros, al promover condiciones edáficas favorables como mayor cobertura vegetal, acumulación de materia orgánica y menor perturbación del perfil edáfico, condiciones esenciales para la recuperación de la funcionalidad biológica del suelo.

El barbecho “mejorado” observado en La Merced, es decir el descanso del suelo con alta acumulación de materia orgánica intencionada que se realiza después del manejo agroecológico, corresponde a un tipo particular de uso de suelo con un alto potencial para la rehabilitación de la diversidad edáfica del suelo, presenta desafíos y preguntas para futuras investigaciones como: *¿Cuáles deberían ser las estrategias de manejo para intensificar el barbecho entre épocas de cultivo en ecosistemas andinos?, o ¿Qué especies y qué arreglos permiten una mayor producción de biomasa y condiciones favorables para el crecimiento de lombrices, artrópodos y microbiomasa?*

Por otro lado, en la zona de estudio Cacha no hubo diferencias entre los manejos agroecológico, tradicional y barbecho, considerando que en Cacha tienen 5 años de rehabilitación y en la Merced 15 años, concluimos que el tiempo de rehabilitación y la intensidad de las prácticas podrían influir en la diferenciación de los manejos y por consiguiente en el incremento de la biodiversidad en los suelos degradados. Lo cual reafirma que los efectos positivos del manejo se consolidan con el

tiempo y que la recuperación funcional del suelo requiere de procesos ecológicos de mediano y largo plazo.

En el mismo sentido, en lo referente a la microbiomasa de bacterias y los hongos, todos los manejos fueron iguales, sin embargo el contenido fue superior al ecosistema degradado en las dos zonas de estudio. Específicamente, en la Merced se observó más microbiomasa y una mayor proporción de hongos:bacterias que en Cacha, que también podría deberse al tiempo de rehabilitación de los suelos degradados que difieren en las dos zonas.

Finalmente, y desde una perspectiva socio-ecológica, la implementación sostenida e integrada de éstos tres manejos tiene implicaciones directas sobre los medios de vida de las comunidades rurales andinas del Ecuador. Así, el incremento de la composición de la biodiversidad del suelo puede traducirse en suelos más fértiles, resilientes y productivos, disminuyendo la presión sobre ecosistemas frágiles como el páramo y reduciendo la vulnerabilidad de los agricultores familiares frente al cambio climático y degradación de los agroecosistemas.

CAPITULO III

Influencia del manejo de suelo en la descomposición de la materia orgánica, contenido de carbono y respiración de suelos degradados con cangahua en agroecosistemas altoandinos.

Resumen

La dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) constituye un eje central en la sostenibilidad de los agroecosistemas altoandinos, dado su papel en la fertilidad, estructura, retención hídrica y actividad microbiana, así como en la mitigación del cambio climático; en este contexto, los suelos con cangahua, un material endurecido de origen volcánico altamente susceptible a la degradación representa un desafío para la producción agrícola y la conservación de las funciones ecológicas del suelo. El presente estudio evaluó la influencia de diferentes prácticas de manejo del suelo (agroecológico, tradicional, barbecho y ecosistema degradado como control) sobre la descomposición de la materia orgánica, el contenido de carbono y la respiración en dos localidades de la Sierra ecuatoriana: Cacha (Chimborazo) y La Merced (Pichincha), con contrastes históricos de rehabilitación (5 frente a 15 años, respectivamente). Se aplicó el índice de bolsas de té (green y rooibos) para estimar tasas de descomposición de materiales lábiles y recalcitrantes, se determinó el carbono orgánico mediante pérdida por ignición y se midió la respiración con el método Solvita, considerando un diseño con 24 unidades (3 repeticiones por manejo y zona) y análisis estadísticos lineales. Los resultados mostraron que la descomposición del té verde fue significativamente mayor en La Merced que en Cacha y más alta en el manejo agroecológico frente al tradicional y barbecho, mientras que el ecosistema degradado presentó valores marcadamente inferiores; para el té rooibos, las diferencias se explicaron principalmente por el tipo de manejo, con el agroecológico siempre en ventaja, sin interacción con la zona. El contenido de COS fue superior en suelos agroecológicos, seguido de barbecho y tradicional, siendo el más bajo en el ecosistema degradado, lo cual refleja el efecto positivo de la diversificación de cultivos, la cobertura permanente y el uso de enmiendas orgánicas sobre la estabilización del carbono. En cuanto a la respiración del suelo, los valores fueron más altos en La Merced que en Cacha, y consistentemente más bajos en el ecosistema degradado que en los demás manejos, confirmando la pérdida de funcionalidad biológica en suelos con cangahua expuesta. Estos hallazgos evidencian que el manejo agroecológico, implementado de manera sistemática y sostenida, potencia la descomposición de materia orgánica y la acumulación de carbono, contribuyendo a la rehabilitación de suelos degradados y al secuestro de carbono en sistemas frágiles de montaña; en contraste, el manejo tradicional y el barbecho ofrecen beneficios intermedios, mientras que los ecosistemas degradados evidencian un colapso funcional. En conclusión, la investigación confirma que la transición agroecológica, al integrar principios ecológicos con prácticas campesinas,

constituye una estrategia clave para restaurar suelos altoandinos con cangahua, mejorar su capacidad de sostener la producción agrícola y reforzar su rol en la mitigación del cambio climático, aportando evidencia científica para la formulación de políticas públicas y prácticas sostenibles en territorios rurales de alta vulnerabilidad.

Palabras clave: Carbono orgánico del suelo, actividad microbiológica del suelo, cangahua, agroecología, agroecosistemas altoandinos.

Abstract

The dynamics of soil organic carbon (SOC) are central to the sustainability of high-Andean agroecosystems due to their critical roles in soil fertility, structure, water retention, microbial activity, and climate change mitigation. In this context, soils containing cangahua, a hardened volcanic material highly susceptible to degradation pose significant challenges for agricultural productivity and ecosystem service conservation. This study evaluated the influence of different soil management practices (agroecological, traditional, fallow, and degraded ecosystem as control) on organic matter decomposition, carbon content, and soil respiration in two Ecuadorian highland sites: Cacha (Chimborazo) and La Merced (Pichincha), with contrasting rehabilitation histories (5 vs. 15 years, respectively). Tea bag indices (green and rooibos) were used to estimate decomposition rates of labile and recalcitrant materials, SOC content was determined by loss on ignition, and respiration was measured using the Solvita® method within a design of 24 experimental units (three replicates per management and site) and linear statistical analyses. Results indicated that green tea decomposition was significantly higher in La Merced than in Cacha and greatest under agroecological management compared to traditional and fallow practices, while degraded ecosystems showed markedly lower values. For rooibos tea, differences were primarily explained by management type, consistently favoring agroecological practices, without site interaction. SOC content was highest in agroecological soils, followed by fallow and traditional management, and lowest in degraded ecosystems, reflecting the positive effects of crop diversification, permanent cover, and organic amendments on carbon stabilization. Soil respiration was higher in La Merced than in Cacha and consistently lower in degraded ecosystems, confirming the loss of biological functionality in exposed cangahua soils. These findings demonstrate that systematic and sustained agroecological management enhances microbial activity, organic matter

decomposition, and carbon accumulation, contributing to the rehabilitation of degraded soils and carbon sequestration in fragile mountain systems. In contrast, traditional and fallow practices provide intermediate benefits insufficient to reverse severe degradation, while degraded ecosystems exhibit functional collapse in biogeochemical terms. In conclusion, the study confirms that agroecological transitions, integrating ecological principles with peasant practices, constitute a key strategy for restoring high-Andean cangahua soils, improving agricultural productivity, and strengthening climate change mitigation, providing scientific evidence to inform public policy and sustainable practices in highly vulnerable rural territories.

Keywords: Soil organic carbon, agroecological management, cangahua soils, high-andean agroecosystems, soil microbial activity.

Introducción

En las últimas décadas, la pérdida progresiva del carbono orgánico del suelo (COS) exacerbada por el cambio de uso del suelo, ha sido documentada como una de las principales causas de la degradación de los agroecosistemas a nivel global (FAO, 2017). En particular, los suelos altoandinos se caracterizan por su origen volcánico y altos niveles de materia orgánica, representando sistemas frágiles que enfrentan amenazas crecientes debido al uso intensivo y la degradación por prácticas agrícolas inadecuadas como: la pérdida de cobertura vegetal, el monocultivo, la labranza excesiva y la escasa rotación de cultivos, afectando directamente la calidad del suelo, sus niveles de carbono orgánico y funciones ecológicas asociadas (FAO, 2021) (INEC, 2016).

Así, el COS representa uno de los principales reservorios de carbono de la biosfera, estimándose que contiene aproximadamente 1.500 petagramos (Pg) de carbono, una cifra que duplica la cantidad presente en la atmósfera y supera considerablemente el contenido en la biomasa vegetal (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). Su dinámica está intrínsecamente vinculada al contenido de materia orgánica del suelo (MOS) elemento clave para la fertilidad, estructura, retención de agua y actividad biológica edáfica. Por otro lado, la descomposición de la MOS se reconoce como un proceso determinante, no solo para la liberación de nutrientes esenciales como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), sino también para la estabilización del COS y de los flujos biogeoquímicos (Julca-Otiniano et al., 2006; Romaniuk et al., 2021).

Además, este proceso edáfico está influenciado por tres elementos claves: la composición de la biota, el ambiente físico (oxígeno, humedad y temperatura) y la calidad de la materia orgánica (MO). Globalmente, es conocido que las plantas en descomposición (hojarasca, madera, frutas y flores) generan más del 90% de la MO en las regiones continentales anualmente. (Julca-Otiniano et al., 2006).

Otro proceso importante y determinante para la salud edáfica, es la respiración del suelo por reflejar la actividad microbiana y la mineralización de la materia orgánica, convirtiéndose en un indicador importante de la salud del suelo y de su capacidad para sostener la productividad agrícola de forma sostenible (Lal, 2004).

El presente estudio se realizó en los agroecosistemas de dos zonas (Cacha y La Merced) del Centro del Ecuador y que presentan suelos con cangahua que es un material endurecido volcánico proveniente del horizonte C. Estos son caracterizándose principalmente por su baja presencia de nutrientes y organismos, y frecuentemente están ubicados en pendientes entre el 12% y 60% de inclinación (GADPR CACHA, 2019, p. 35) por lo que, la población opta por abandonar las zonas productivas desencadenando problemas socio-ecológicos como el avance de la frontera agrícola y degradación de los ecosistemas.

Por lo que, el manejo del recurso suelo representa un pilar fundamental para el mantenimiento de la productividad, la resiliencia ecológica y la mitigación del cambio climático en las zonas de estudio. En ese sentido, las estrategias de manejo, como el agroecológico (MA) o el tradicional (MT) que son los manejos más comunes en las zonas de estudio, tienen impactos diferenciados sobre los componentes edáficos. Diversos estudios han demostrado que estos sistemas de manejo al fomentar una mayor diversidad biológica y el uso de enmiendas orgánicas, promueven la acumulación de COS, incrementan la estabilidad de agregados y mejoran la actividad microbiana del suelo (Ibáñez, 2016; Rivera, 2023).

En ese sentido, el objetivo de este estudio es evaluar como el manejo agroecológico y el manejo tradicional influyen en la descomposición de la materia orgánica, el contenido de carbono y la respiración del suelo de las dos localidades, considerando que, en la Merced los suelos tienen procesos de rehabilitación 10 años más que en Cacha, además las prácticas son más sistematizadas.

Así, la investigación cobra especial relevancia en el actual contexto de cambio climático, donde la agricultura de montaña debe orientarse hacia modelos resilientes y regenerativos. A su vez, los resultados derivados de este trabajo podrán constituir una base técnica y científica para orientar políticas públicas, prácticas campesinas y programas de educación ambiental en zonas de alta vulnerabilidad ecológica, generando además evidencias para la restauración de ecosistemas degradados en la región altoandina ecuatoriana.

Materiales y métodos

Área de estudio

Para el presente estudio identificamos dos zonas de estudio en los Andes ecuatorianos: Zona 1 Cacha, ubicada en la sierra central en la provincia de Chimborazo ($1^{\circ}43'27.5''\text{S}$ $78^{\circ}43'13.8''\text{W}$) y Zona 2 La Merced, ubicada en la provincia de Pichincha ($0^{\circ}16'50.3''\text{S}$ $78^{\circ}24'30.8''\text{W}$), con altitudes entre los 2800 y 3100 msnm, una precipitación media anual de 550 mm para Cacha y 650 mm para la Merced y con una temperatura media anual de 15 C (GAD Parroquial Cacha, 2023; GAD PICHINCHA, 2012). Como se observa en la figura 3.1

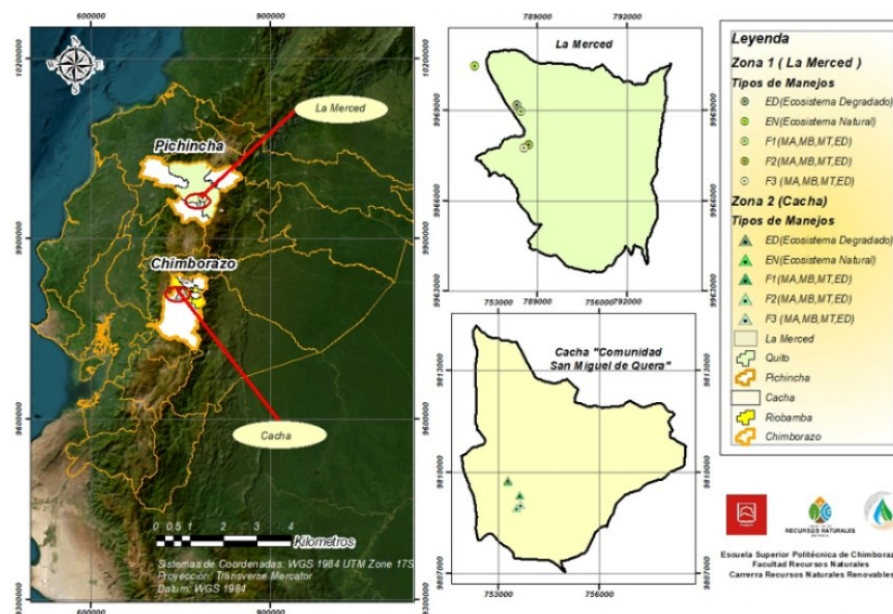


Figura 3.1. Localización de las unidades de muestreo en la sierra ecuatoriana.

El suelo de las unidades de muestreo de la parroquia La Merced presentan formaciones geológicas del Pleistoceno (17.53% de todo el territorio), los cuales se caracterizan por presentar sus flancos cubiertos por cangagua que fueron formados por la acumulación de material piroclástico, flujos de

lavas y lahares, topografía irregular con pendientes que oscilan entre el 12% y el 60%. El uso de suelo en esta parroquia está dominado por los cultivos de ciclo corto con el 26,30 % del territorio y el cultivo de maíz con el 30,45 % (GAD PICHINCHA, 2012), en Cacha son suelos con 5-8 años de manejo, y las prácticas son menos intensivas que en la Merced que se tiene un proceso de (re)habilitación sobre los 15 años.

Por otro lado, Cacha presenta precipitaciones fluctuantes (de 410 a 615 mm anuales), mal distribuidas a lo largo del año. La mayor cantidad de precipitaciones se concentra entre octubre y abril (invierno) en cambio, los meses de junio a septiembre se distinguen por una baja precipitación (verano). La temperatura media anual oscila entre los 10 y 18 °C durante el día, mientras que en las noches se registran temperaturas de hasta 5 °C (Gad Parroquial Cacha 2020)

Diseño del estudio

Los muestreos fueron realizados entre septiembre y octubre del año 2023, al inicio de la temporada lluviosa para las dos localidades. Para la determinación de la influencia de las prácticas de manejo sobre la velocidad de descomposición de la materia orgánica, el contenido de Carbono y la respiración del suelo se seleccionaron 2 tipos de manejo de agroecosistemas (unidad de muestreo): manejo agroecológico (MA) y manejo tradicional (MT) con al menos 5 años de rehabilitación, los cuales fueron comparados con el suelo en descanso o barbecho (MB) y un ecosistema degradado como tratamiento de control (ED), cada unidad de muestreo mide 1000 m².

Para el manejo agroecológico (MA) el propietario del predio primeramente realiza un diagnóstico de la situación actual del suelo y así determina y planifica las técnicas a implementarse según las investigaciones y principios agroecológicos, de ésta manera se busca generar suelos más sanos y por ende agroecosistemas más productivos (Gómez et al., 2015). Es decir, la agricultura ecológica o agroecología se basa en tecnologías que permitan llegar a una producción más sostenible, maximizando los rendimientos y al mismo tiempo conservando los recursos naturales (Gliessman, 2006; Nicholls et al., 2015).

La diferencia con otros manejos radica en la integración de principios ecológicos y la interacción con disciplinas científicas para conseguir la conservación y restauración del suelo, agua y biodiversidad así, mejora la calidad del suelo mediante la incorporación de materia orgánica para el incremento de la actividad biológica del suelo y diversifica las especies en el agroecosistema para mejorar las interacciones biológicas y sinergias (Cortés et al., 2023).

Por otro lado, al manejo tradicional (MT) se lo entiende como un sistema de producción agrícola para la obtención de alimentos, desarrollado sobre la base de conocimientos y prácticas empíricas que han sido adquiridos y enriquecidos por generaciones. Estos sistemas de producción nos brindan una base de conocimientos que podemos aplicar y revalorizar para mejorar los sistemas agrícolas modernos y volverlos más resilientes (Altieri et al., 2015; Méndez et al., 2017).

Así, en las zonas altas de los Andes tradicionalmente se cultivan tubérculos y granos andinos y maíz *Zea mays* y fréjol *Phaseolus vulgaris* en las zonas bajas e interandinas (Hofstede, 2023). En consecuencia, para la presente investigación se ha considerado el cultivo del maíz en asociación o rotación con alguna leguminosa (fréjol) como manejo tradicional por encontrarse en más del 30 % del territorio en las dos zonas de estudio, cabe resaltar que en este tipo de manejo el aporte de biomasa como cobertura de suelo es mínimo después de la cosecha.

Por último, el barbecho (MB) hace referencia al período de descanso del suelo entre cosechas, asociado a la regeneración del suelo en preparación para la siembra, por lo que no se percibe como un momento pasivo, sino un momento imprescindible para la siguiente etapa de refuerzo activo de la cosecha (Licona & Estupiñán, 2019).

Durante éste período, los nutrientes son almacenados en la biomasa de la vegetación sucesional cuando el suelo está siendo preparado y luego liberados para el nuevo ciclo de siembras, (Börner et al., 2007; Licona & Estupiñán, 2019). Es una condición de suelo que se encuentra temporalmente sin cultivos, pero no completamente abandonada y sin cultivar, en varios lugares inclusive se lo cubre con una capa de materia orgánica que es generalmente residuos de la cosecha anterior o transportados de terrenos cercanos, eventualmente esta biomasa se la humedece para favorecer la descomposición (Barrios et al., 2005).

Metodología

Velocidad de descomposición de la materia orgánica.

Para estimar la velocidad de descomposición de la materia orgánica, se utilizó la técnica de bolsas de descomposición o “litter bags”, adaptada para condiciones de campo. El contraste entre la degradación del té verde, un material de degradación rápida, y el té rooibos, un material de degradación lenta facilita la determinación del índice de descomposición de la materia orgánica. Este procedimiento ofrece datos acerca de la habilidad del suelo, en su papel de organismo "vivo",

para convertir los desechos orgánicos en nutrientes accesibles para las plantas y favorecer la acumulación de humus en el suelo (Tresc, Simon & Fliessbach 2015).

Para el procedimiento se tomó un par de bolsas de té de cada tipo (verde y rooibos) y se pesó, incluyendo la etiqueta y la cuerda. Según los fabricantes, las bolsas contienen de 1.2 a 1.8 gramos de té. A continuación, se implementó 3 repeticiones (dos bolsas de Té) en las unidades de estudio. Al momento de enterrar las bolsas en parejas (rooibos y té verde), se enterró cercana la una de la otra, a una profundidad de 8 a 10 cm en agujeros contiguos, cabe mencionar que las etiquetas deben mantenerse visibles en la superficie del suelo. Luego, se apuntó la fecha, la posición geográfica (GPS o mapa de campo) y la información relevante de la localización, en total se enterraron 36 bolsas de té verde y 36 bolsas de té rooibos en cada zona (72 en cada zona). La recuperación de las unidades de muestreo se realizó por mes (cada 30 días), en este caso cada mes se recolectaron 24 bolsas, 12 de cada variedad de té.

Una vez recuperadas las bolsas se retiró la tierra adherida y se secó las bolsas de té cuidadosamente en la estufa a 60°C por 48 horas, luego se pesaron las bolsas de té tras el secado (Tresc, Simon & Fliessbach 2015). Para cuantificar el error debido a restos de suelo adheridos a las bolsas de té, se extrajo el contenido del té y se colocó en crisoles de cerámica, para ponerlos a calentarlos durante cuatro horas a 450 °C en la estufa (Tresc, Simon & Fliessbach 2015). Los crisoles con té se pesaron antes y después de la incineración, asegurándose de que el té esté completamente seco. Se incinero también dos de bolsas de té originales (105° C), para el cálculo del té verde y roiboss, se utilizó la siguiente fórmula (Camacho, Calafat y Bladé 2019).

$$k = \ln(a_r / (W_r(t)/W_r(0) - (1 - a_r))) / t$$

	Tasa de descomposición de la materia Orgánica
	Fracción lábil del Té (Incineración a 105° C (por 1 día 8 h)- $W_r(0)$)
$(1 - a_r)$	Fracción Recalcitrante del Té (1- a_r)
$W_r(t)$	Peso del té después de un tiempo de incubación
$W_r(0)$	Peso del té antes del tiempo de incubación
t	Tiempo (Días)

Contenido de Carbono del Suelo

Este procedimiento constó de dos partes: muestreo y análisis en laboratorio. Para la primera fase, en cada unidad de muestreo se tomó con un barreno de 10 a 15 submuestras a una profundidad de 10 cm. En cada submuestra recolectada se eliminó los restos de vegetación o residuos que se encontraban en el sitio, luego se homogenizaron (mezclaron) y se obtuvo una muestra compuesta de 1000 g (Jarramillo 2020).

Para el procesamiento de la muestra en laboratorio, se tomó el peso inicial de los crisoles vacíos en la balanza de precisión para añadir 5 g de muestra de suelo en los, posteriormente se los colocó en la estufa durante 24 h a una temperatura de 105 °C, luego se extrajeron los crisoles para tomarse los datos de la primera temperatura. Posteriormente se colocaron los crisoles en una mufla durante 40 min a una temperatura de 450 °C, se pesaron y registraron los datos de la segunda Temperatura (Eyherabide et al. 2014).

Para calcular el porcentaje de Materia Orgánica (M.O) se utilizó la siguiente ecuación. Según Eyherabide et al (2014).

$$\% \text{ M. O} = ((\text{Peso Estufa } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso Mufla } 450^{\circ}\text{C})) / (\text{Peso Estufa } 105^{\circ}\text{C}) \cdot 100$$

Finalmente, para calcular el porcentaje de Carbono Orgánico del suelo a partir de la MO se debe utilizar el factor Van Bemmelen de 1,724 el cual asume que el 58% de la materia orgánica del suelo está compuesta por carbono ($1/0,58 = 1,724$), es decir $\% \text{CO} = \% \text{MO} / 1,724$ (Eduardo Martínez, Juan Pablo Fuentes y Edmundo Acevedo 2008).

Respiración del Suelo

Para calcular la respiración del suelo se utilizó el método denominado SOLVITA (<https://solvita.com>), el cual es un kit que consta de una sonda, un frasco hermético y un frasco pequeño para la muestra. La sonda absorbe el dióxido de carbono (CO₂) que emanan los microorganismos de la muestra de suelo (Haney & Haney, 2015).

En campo se tomaron muestras de suelo a 10 cm en cada una de las unidades de muestreo, luego las muestras compuestas fueron secadas a temperatura ambiente durante 24 horas, se tomaron luego 30 cc de suelo que fue colocado en el frasco pequeño del kit para hidratarlas con 9cc de agua destilada según la metodología, finalmente se procedió a colocar la sonda sobre la muestra de suelo y fue colocada dentro del frasco hermético, finalmente se incubaron a 20°C en donde se dejó

reposar durante 24 horas. La escala de color de la sonda varía de acuerdo a la capacidad que tenga el suelo para generar CO₂ microbiano en un rango de 0 a 250 miligramos/kilogramos/día (mg/kg/día), la identificación del color se realizó visualmente siguiendo la metodología y para la interpretación de resultados se toma como referencia la siguiente tabla 3.1 (Haney & Haney, 2015).

Tabla 3.1: Guía de referencia para interpretación de resultados

Color de la prueba	ppm de CO₂ en el espacio libre del tarro	Resultado del suelo CO₂ – C como mg/L	Características del suelo analizado
1	500	Menor a 5	Actividad biológica escasa y nulo potencial nitrógeno
2	1000	15	Actividad biológica baja y muy bajo potencial nitrógeno
3	3000	30	Nitrógeno relativamente bajo
4	1000	75	Actividad biológica media y cierta presencia de nitrógeno
4,5	1500	110	Media - alta actividad biológica y potencial de nitrógeno
5	3000	200	Alta actividad biológica y potencial de nitrógeno

Fuente: Shedekar, 2019

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico realizamos 3 repeticiones por cada manejo y por zona, de la misma manera para el suelo degradado y barbecho, con un total de 24 unidades de muestreo, como presenta la tabla 3.2. Utilizamos modelos lineales para evaluar el efecto del tipo de manejo y zona de estudio sobre: a) la tasa de descomposición, b) el carbono orgánico del suelo y c) la tasa de respiración del suelo. Los datos de respiración del suelo se transformaron en logaritmos antes del análisis para cumplir con las premisas de la prueba.

Tabla 3.2. Número de unidades de muestreo (U.M) en las zonas de estudio

	Manejo Agroecológico (MA)	Manejo Tradicional (MT)	Degradado (ED)	Barbecho (MB)
Zona 1 (Z1)	3 Fincas	3 Fincas	3 Fincas	3 Fincas
Cacha	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	X 3 repeticiones
Zona 2 (Z2)	3 Fincas	3 Fincas	3 Fincas	3 Fincas
La Merced	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	x 3 repeticiones	X 3 repeticiones
Total	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.	6 U.M.
Total unidades				24 U.M.

Resultados

Tasa de descomposición de la materia orgánica.

Observamos un efecto del tipo de manejo ($F_{3,16} = 590,78$, $P < 0,001$) y de la zona de estudio ($F_{1,16} = 25,98$, $P < 0,001$), pero no se observó interacción entre estos factores ($F_{3,16} = 0,65$, $P = 0,591$) sobre la tasa de descomposición del té verde. Por otro lado, la tasa de descomposición del rooibos fue diferente entre los tipos de manejo ($F_{3,16} = 63,07$, $P < 0,001$), pero no entre las zonas ($F_{1,16} = 0,45$, $P = 0,511$). En general, la tasa de descomposición del té verde fue más rápida en La Merced que en Cacha y más rápida en el MA que en el MT y MB. Por otro lado, el suelo del ecosistema degradado tuvo una tasa mucho menor (fue diferente) que todos los manejos mencionados, incluido el barbecho, como se observa en la figura 3.2.

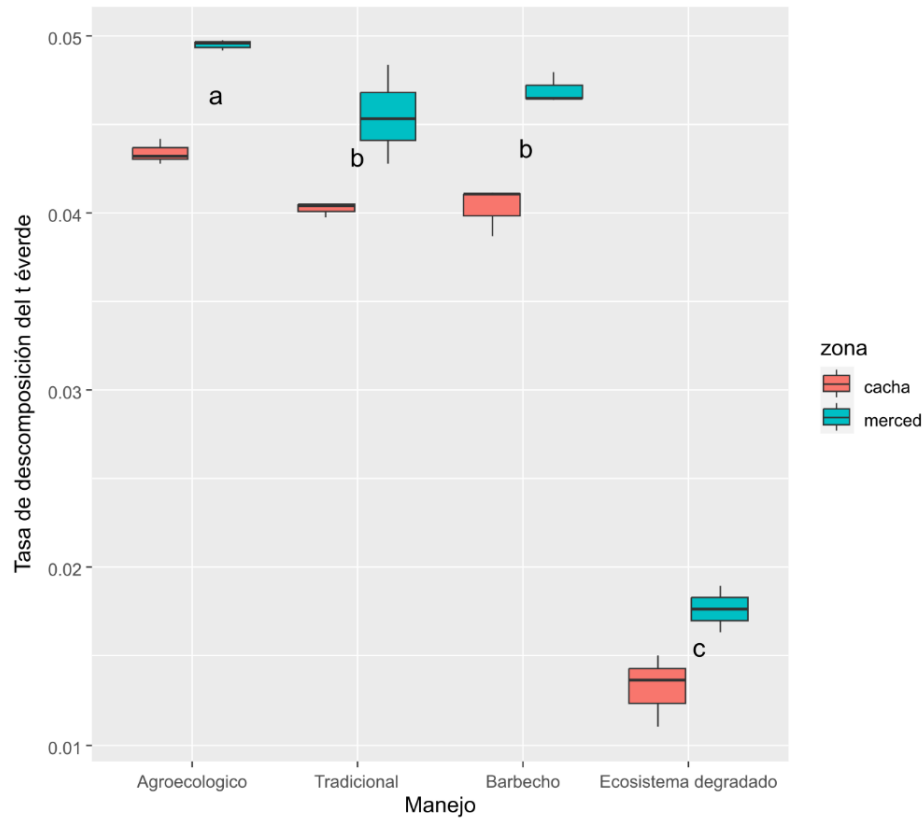


Figura 3.2 Tasa de descomposición del té verde en los diferentes manejos. La descomposición fue mayor en la Merced que Cacha, el ecosistema degradado fue diferente que todos los manejos, y el MA fue el que presentó la tasa de descomposición más alta.

En el mismo sentido, al analizar el material del té roiboos, se observó que la tasa de descomposición es más lenta en el suelo del ecosistema degradado que en los demás manejos. Además, no hay diferencia entre zonas y no hay interacción, como se observa en la figura 3.3

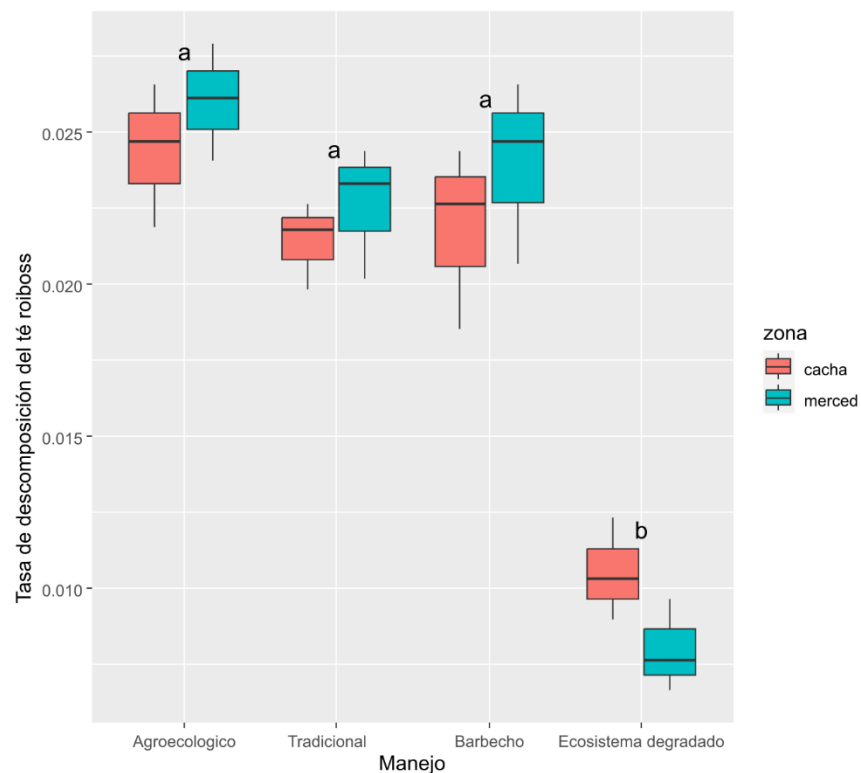


Figura 3.3 Tasa de descomposición del té roiboos en los diferentes manejos. El suelo del ecosistema degradado presentó la menor tasa, y en general Cacha fue menor que la Merced.

Contenido de Carbono del Suelo

Al analizar el COS observamos un efecto del tipo de manejo ($F_{3,16} = 31.62$, $P < 0.001$), pero no de la zona ($F_{1,16} = 2.19$, $P = 0.158$) tampoco se observó interacciones entre manejo y zona ($F_{3,16} = 0.97$, $P = 0.431$). El contenido de carbono fue mayor en el MA que en el MT y MB, además estos manejos fueron superiores al suelo del ecosistema degradado.

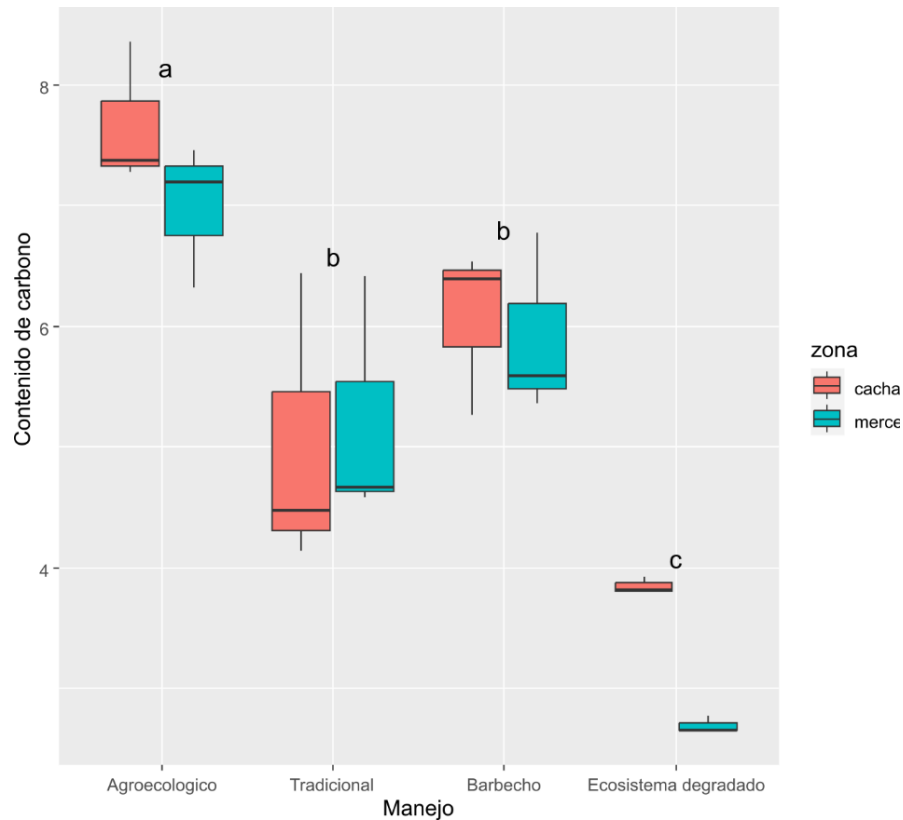


Figura 3.4. Contenido de Carbono en los diferentes tipos de manejo, el suelo del ecosistema degradado fue menor que los demás manejos, en tanto que el MA fue el que presentó el mayor contenido de Carbono.

Respiración del Suelo

Para el análisis, los datos fueron transformados en (log) para dar homogeneidad a las varianzas, se observó que la respiración fue más alta en los agroecosistemas de la Merce que en Cacha ($F_{1,16} = 18.89$, $P < 0.001$), por otro lado, la respiración fue más baja en el suelo del ecosistema degradado que en los demás manejos ($F_{3,16} = 12.24$, $P < 0.001$), cómo se observa en la figura 3.5.

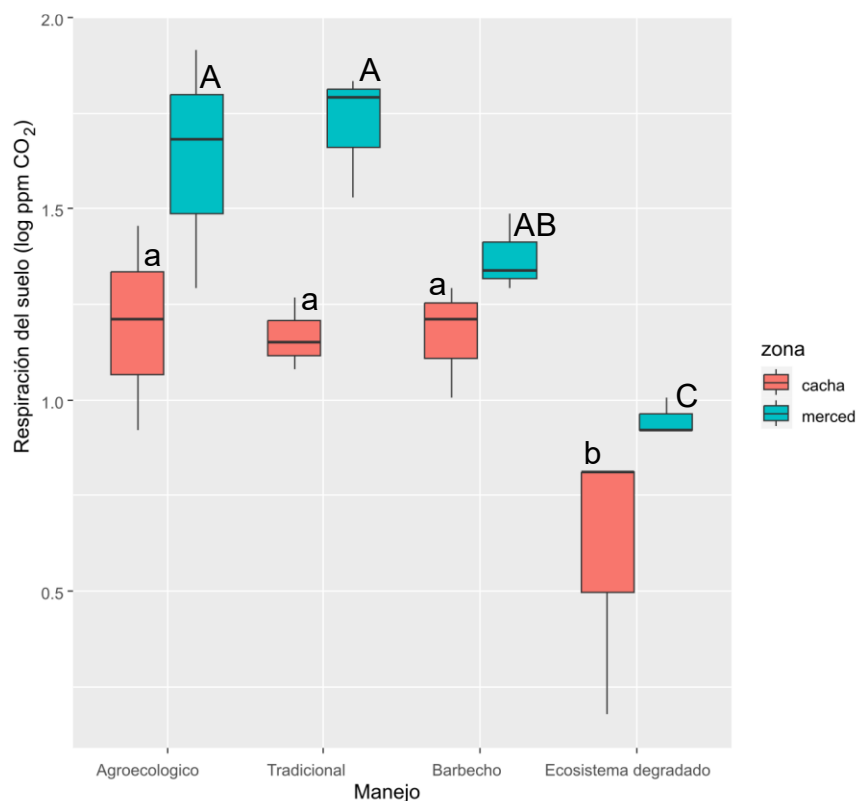


Figura 3.5. Respiración de los agroecosistemas, el suelo del ecosistema degradado presentó menor respiración que los demás manejos y de la misma manera en la Merced se observó más respiración que en Cacha. Existe diferencia entre zonas pero no hay interacción entre zonas y tratamiento.

Discusión

Los resultados indican que los manejos analizados presentan una influencia significativa sobre la tasa de descomposición de la materia orgánica, el contenido de carbono y la tasa de respiración del suelo. En ese sentido, se observó también que el suelo del ecosistema degradado presentó valores inferiores de descomposición, carbono y respiración del suelo, en comparación a los manejos estudiados.

Tasa de descomposición de la materia orgánica.

La tasa de descomposición de la materia orgánica, estimada mediante el método del té verde, mostró diferencias significativas entre zonas y tipos de manejo del suelo. En términos generales, la descomposición fue más rápida en la zona de La Merced en comparación con Cacha, lo cual sugiere una mayor actividad microbiana y posiblemente mejores condiciones edáficas en términos de temperatura, humedad, contenido de carbono disponible y diversidad funcional (Keuskamp et al., 2013; Bradford et al., 2016) en la Merced más que en Cacha. Estas diferencias podrían estar

asociadas también a factores altitudinales o históricos de uso del suelo que modulan el ecosistema edáfico (Lauber et al., 2008). Así, la Merced se encuentra a 2800 msnm, en tanto que las unidades de muestreo de Cacha están sobre los 3200 msnm, además en La Merced se tiene un histórico de más de 15 años de manejo y rehabilitación de suelos con cangahua, en tanto que en Cacha solamente 5 años, que es reflejado en los datos de descomposición de la materia orgánica.

En cuanto al tipo de manejo, se observó que los suelos con manejo agroecológico (MA) presentaron las tasas de descomposición más altas, superando tanto al manejo tradicional (MT) como a los suelos que se encuentran en descanso o barbecho (MB). Este hallazgo coincide con investigaciones previas que destacan cómo los sistemas agroecológicos, al promover la diversidad vegetal, el reciclaje de nutrientes y la cobertura permanente del suelo, favorecen condiciones óptimas para la actividad de la biota edáfica y aceleran los procesos de descomposición de la materia orgánica (Altieri & Nicholls, 2004; Lehman et al., 2015).

En contraste, los suelos de los ecosistemas degradados (ED) exhibieron una tasa de descomposición menor en comparación con todos los demás tratamientos (manejos), incluyendo el barbecho. Esto indica un estado crítico de funcionalidad biológica, probablemente vinculado a la pérdida de las capas superficiales de suelo, considerando que esta unidad de muestreo es cangahua aflorada desde el horizonte C con escasa materia orgánica y diversidad microbiana, condiciones que limitan no solo la capacidad de éste “suelo con cangahua endurecido” para la descomposición de la materia orgánica, sino también para la mitigación del cambio climático mediante la estabilización del carbono (Guerra et al., 2020; Wall et al., 2015). Así, al ser el suelo degradado (ED) el tratamiento testigo, los datos están mostrando que todos los manejos (tratamientos) están influenciando en la descomposición de la materia orgánica y por consiguiente en la rehabilitación de suelos con cangahua degradados.

Por otro lado, la tasa de descomposición del material recalcitrante (té rooibos) mostró patrones consistentes con un mayor grado de estabilidad de la materia orgánica en comparación con el té verde, como era esperable dada su mayor resistencia a la actividad microbiana (Keuskamp et al., 2013). En general, los valores de descomposición fueron significativamente más bajos en los suelos de Cacha en comparación con los de La Merced, lo cual refuerza la posible influencia de la diferencia de altitud y el histórico del manejo en esta localidad, generando condiciones menos favorables para la descomposición microbiana que en Cacha.

Además, se observó que el suelo del ecosistema degradado (Cangahua) presentó la tasa de descomposición más baja entre todos los tratamientos, sin diferencias significativas entre zonas. Esto indica que la degradación del suelo conlleva una disminución sustancial de la capacidad del sistema para procesar incluso los compuestos más estables, mostrando además una degradación del microbioma edáfico, de la red trófica y pérdida de diversidad funcional (Bradford et al., 2016; Wall et al., 2015).

La ausencia de interacción entre zona y uso del suelo sugiere que los efectos observados responden más al tipo de manejo que a condiciones ambientales locales. De hecho, los suelos bajo manejo agroecológico (MA), tradicional (MT) y en barbecho (MB) mostraron tasas similares de descomposición del rooibos en cada zona, indicando que si bien existen diferencias marcadas para materiales lábiles (como el té verde), estas diferencias se atenúan al tratarse de compuestos más recalcitrantes (como el té roiboos). Esto es coherente con estudios que han señalado que la velocidad de descomposición de la materia orgánica estable depende en menor medida del tipo de manejo agrícola y más de factores abióticos, como la textura del suelo o la acumulación histórica de carbono (Cotrufo et al., 2013; Liang et al., 2017).

Contenido de Carbono del Suelo

El contenido de carbono orgánico del suelo (COS), medido por pérdida por ignición, mostró diferencias significativas entre los distintos tipos de uso del suelo. Como era esperable, los suelos con manejo agroecológico (MA) presentaron los valores más altos de carbono, seguidos por los suelos en barbecho (MB) y manejo tradicional (MT), mientras que el ecosistema degradado (ED) exhibió los niveles más bajos. Este patrón refleja directamente la influencia del tipo de manejo sobre los procesos de acumulación y estabilización del carbono en el suelo, un componente clave de la salud del ecosistema edáfico (Lal, 2004; Oldfield et al., 2019).

Estos resultados son consistentes con los principios agroecológicos que, al mantener una cobertura vegetal permanente, promover la diversificación de cultivos y reducir el disturbio del suelo, favorecen la acumulación de carbono a través del aumento de biomasa radicular, residuos vegetales y actividad microbiana (Gattinger et al., 2012; Hijbeek et al., 2017). En contraste, los sistemas tradicionales y de barbecho tienden a generar una mayor pérdida de carbono por el laboreo y movimiento excesivo de las capas superficiales, mineralización acelerada en algunos casos, y por dejar el suelo descubierto por períodos de tiempo extensos.

En referencia al ecosistema degradado, donde el contenido de carbono fue sustancialmente menor que en todos los demás usos, pone en evidencia además una posible afectación en su funcionalidad para retener agua, nutrientes y sostener la biodiversidad microbiana, como lo menciona Lehmann et al (2020). Además, la disminución de carbono en estos suelos podría representar una fuente potencial de emisiones de CO₂ a la atmósfera desde los ecosistemas degradados, agravando los efectos del cambio climático (Amundson, 2001).

Respiración del Suelo

Se observó que la respiración del suelo fue significativamente más alta en los agroecosistemas de La Merced en comparación con los de Cacha. Este hallazgo podría señalar que las condiciones ambientales y de manejo en La Merced favorecen una mayor actividad microbiana y por ende, una mayor respiración del suelo, considerando también que se encuentran a diferente altitud. Estudios han demostrado que la respiración del suelo puede variar considerablemente entre diferentes zonas debido a factores como la temperatura, la humedad y la calidad del suelo (Lloyd & Taylor, 1994; Saynes-Santillan & Ramírez, 2018).

En cuanto a los diferentes manejos del suelo, se encontró que la respiración fue más baja en el ecosistema degradado (suelo con cangahua) en comparación con los otros tratamientos (agroecológico, tradicional y el suelo en barbecho). Este resultado es consistente con investigaciones que han evidenciado que los suelos degradados tienen menor actividad microbiana debido a la pérdida de materia orgánica y nutrientes esenciales (Luo & Zhou, 2006; Montoya-Jasso et al., 2024). Además, la respiración en suelos degradados puede ser un indicador de una menor capacidad para los ciclos biogeoquímicos incluido el ciclo del Carbono, lo que podría tener implicaciones negativas para el cambio climático.

A pesar de las diferencias observadas entre las zonas y los tratamientos, no se encontró una interacción significativa entre estos factores, lo que sugiere que las prácticas de manejo tienen impacto en la respiración del suelo, independientemente de la zona en la que se apliquen, como lo menciona Lloyd & Taylor (1994).

Conclusiones e implicaciones.

Los resultados obtenidos evidencian que los sistemas de manejo agroecológico presentan una tendencia de una mayor funcionalidad (notada en relación a la tasa de descomposición de la materia orgánica y COS) del suelo en comparación con el manejo tradicional, con el suelo en

barbecho y con mayor diferencia frente al suelo de ecosistemas degradados que fue el tratamiento testigo, es decir el manejo agroecológico es el que presenta una mejor rehabilitación de suelo degradado.

Estos resultados refuerzan la idea de que la salud del suelo no depende únicamente de dejar de cultivar (como en el barbecho), sino de integrar prácticas de regeneración de las capas superficiales del ecosistema edáfico. Además, al no presentar interacciones entre zona y manejo y mantenerse éste patrón para los sistemas agroecológicos en todos los análisis, refuerza la robustez de éste indicador para evaluar la calidad biológica del suelo.

En lo que se refiere a la comparación entre las zonas de estudio, se destaca La Merced como la zona con mayor tasa de descomposición de materia orgánica y respiración del suelo, lo que podría indicar la influencia de la altitud y temperatura para estos dos indicadores, considerando que La Merced se encuentra 400 msnm más bajo que Cacha.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que la implementación de prácticas agroecológicas tiene el potencial de restaurar y mantener la salud del suelo, promoviendo procesos ecológicos esenciales para la rehabilitación de suelos degradados (ED) de cangahua y para la mitigación del cambio climático. Finalmente, se resalta el valor de emplear múltiples indicadores para evaluar la salud del suelo, proporcionando una visión integrada y robusta de su estado funcional.

Conclusiones generales.

Los resultados evidencian que es posible (re)habilitar la composición edáfica y restablecer funciones ecológicas en suelos desarrollados sobre cangahua, siempre que se implementen prácticas de manejo capaces de mejorar la estructura, dinámica y biodiversidad del suelo. Es decir, la (re)habilitación no depende únicamente del tipo de práctica implementada, sino también de la planificación, la intensidad y principalmente del tiempo de implementación. Esto se refleja claramente en las diferencias observadas entre los agroecosistemas con 5 años de manejo en Cacha y aquellos con 15 años en La Merced, donde el tiempo y la intensidad de manejo permitió consolidar procesos ecológicos más maduros para suelos degradados, evidenciados en el incremento de la biodiversidad edáfica.

Así mismo, las prácticas que mostraron un mayor potencial para la rehabilitación de suelos degradados fueron: el barbecho y el manejo agroecológico en La Merced, que actuaron mediante mecanismos complementarios. Por un lado, el barbecho favoreció la recuperación de la fauna edáfica, restaurando redes tróficas fundamentales, mientras que el manejo agroecológico impulsó la acumulación de carbono orgánico, el ciclado eficiente de la materia orgánica (velocidad de descomposición) y una mayor diversidad de artrópodos. Estos resultados reflejan que prácticas que integran cobertura vegetal, adición de materia orgánica, diversidad de cultivos y mínima perturbación son particularmente efectivas para reactivar procesos ecológicos en suelos endurecidos y de baja fertilidad.

Finalmente, los resultados tienen implicaciones directas para programas de (re)habilitación ecológica y manejo del suelo en los Andes ecuatorianos. Las comunidades que trabajan sobre suelos degradados desarrollados en cangahua pueden lograr recuperaciones significativas siempre que adopten prácticas de manejo continuas, diversificadas y de largo plazo, respaldadas por procesos de capacitación y monitoreo continuo. Finalmente concluimos que, la (re)habilitación de suelos no solo es un desafío ecológico, sino también social para alcanzar suelos más funcionales, productivos y resilientes frente al cambio climático.

Referencias bibliográficas

- ALLISON, S. D., & MARTINY, J. B. H. (2008). Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(Supplement 1), 11512–11519. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801925105>
- ALTIERI, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)
- ALTIERI, M. A., & NICHOLLS, C. I. (2004). Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable. CLACSO.
- ALTIERI, M. A., & NICHOLLS, C. I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático. *Agroecología*, 8(1), 7–20.
- ALTIERI, M. A., NICHOLLS, C. I., HENAO, A., & LANA, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- ALTIERI, M. A., NICHOLLS, C. I., HENAO, A., & LANA, M. A. (2017). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-2>
- AMANI, M., KHAJEHALI, J., MORADI-FARADONBEH, M. y MACCHIONI, F. (2020). Species diversity of soil mites (Acari: Mesostigmata) under different agricultural land use types. *Persian Journal of Acarology*, 9(4), 353–366. <https://doi.org/10.22073/pja.v9i4.59610>
- AMUNDSON, R. (2001). The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 535–562. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.535>
- ANDERSON, T. H., & DOMSCH, K. H. (1989). Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(4), 471–479. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90117-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90117-X)
- ASFAW, A. y ZEWUDIE, S. (2021). Soil macrofauna abundance, biomass and selected soil properties in the home garden and coffee-based agroforestry systems at Wondo Genet, Ethiopia.

ASTIER, M., SPEELMAN, E. N., LÓPEZ-RIDAURA, S., MASERA, O. R., & GONZALEZ-ESQUIVEL, C. (2011). Sustainability indicators: Methodological challenges and perspectives. *Ecological Indicators*, 11(5), 1170–1180.

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>

BARRIOS, E., COBO, J. G., RAO, I. M., THOMAS, R. J., AMÉZQUITA, E., JIMÉNEZ, J. J., & RONDÓN, M. A. (2005). Fallow management for soil fertility recovery in tropical Andean agroecosystems in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 110(1–2), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.009>

BARRIOS, E., DELVE, R. J., BEKUNDA, M., MOWO, J., AGUNDA, J., RAMISCH, J., TREJO, M. T. y THOMAS, R. J. (2006). Indicators of soil quality: development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*, 135, 248–259.

BELLOSI, E. y CANTIL, L. F. (2012). Paleosuelos y trazas fósiles de la Formación Cangahua (Pleistoceno): reconstrucción de un sistema volcánico-lástico intermontano en los Andes centrales de Ecuador.

BOLGER, T., ARROYO, J. y PIOTROWSKA, K. (2018). A catalogue of the species of Mesostigmata (Arachnida, Acari, Parasitiformes) recorded from Ireland including information on their geographical distribution and habitats. ISBN 9781776705320. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4519.1.1>

BÖRNER, J., DENICH, M., MENDOZA-ESCALANTE, A., HEDDEN-DUNKHORST, B. y DE ABREU SÁ, T. D. (2007). Alternatives to slash-and-burn in forest-based fallow systems of the eastern Brazilian Amazon region: Technology and policy options to halt ecological degradation and improve rural welfare. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30290-2_17

BOSSIO, D.A., COOK-PATTON, S.C., ELLIS, P.W., FARGIONE, J., SANDERMAN, J., SMITH, P., WOOD, S., ZOMER, R.J., VON UNGER, M., EMMER, I.M. y GRISCOM, B.W., 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. En: Number: 5 Publisher: Nature Publishing Group, Nat Sustain [en línea], vol. 3, no. 5, pp. 391-398. [Consulta: 9 septiembre 2023]. ISSN 2398-9629. DOI 10.1038/s41893-020-0491-z. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41893-020-0491-z>.

BÜNEMANN, E. K., BONGIORNO, G., BAI, Z., CREAMER, R. E., DE DEYN, G., DE GOEDE, R., ... & BRUSSAARD, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

CASTRO-HUERTA, R. A., FALCO, L. B., SANDLER, R. V. y COVIELLA, C. E. (2015). Differential contribution of soil biota groups to plant litter decomposition as mediated by soil use. *PeerJ*, 3, e826. <https://doi.org/10.7717/peerj.826>

- CASTRO LÓPEZ, J., 2017. Papel de la fauna edáfica en el funcionamiento de los ecosistemas agrícolas [en línea]. S.l.: Ecología e biología animal. [Consulta: 2 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/761>.
- CHAMORRO, Y., TORREGROZA ESPINOSA, A. C., PALLARES, M. I. M., OSORIO, D. P., PATERNINA, A. C. y ECHEVERRÍA GONZÁLEZ, A. (2022). Soil macrofauna, mesofauna and microfauna and their relationship with soil quality in agricultural areas in northern Colombia. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20210132>
- CHAN, K. Y. (2001). An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - Implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research*, 57(4), 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2)
- CHIVENGE, P., VANLAUWE, B., & SIX, J. (2011). Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 342(1–2), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0626-5>
- CHIVENGE, P., VANLAUWE, B., & SIX, J. (2015). Organic resource quality and quantity for maintaining soil fertility in tropical systems. *Nature Geoscience*, 4, 506–510. <https://doi.org/10.1038/ngeo1184>
- COQ, S., GANAULT, P., LE MER, G., NAHMANI, J., CAPOWIEZ, Y., DIGNAC, M.-F., RUMPEL, C. y JOLY, F.-X. (2022). Faeces traits as unifying predictors of detritivore effects on organic matter turnover. *Geoderma*, 422, 115940. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115940>
- CORTÉS, J., VIELI, L. y IBARRA, J. T. (2023). Family farming systems: An index-based approach to the drivers of agroecological principles in the southern Andes. *Ecological Indicators*, 154(May). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110640>
- DAVIS, A. E., BICKEL, D. J., SAUNDERS, M. E. y RADER, R. (2023). Crop-pollinating Diptera have diverse diets and habitat needs in both larval and adult stages. *Ecological Applications*, 33(5), 1–13. <https://doi.org/10.1002/eap.2859>
- DEL BARRIO, G., SANJUÁN, M. E., RUIZ, A., & MARTÍNEZ-VALDERRAMA, J. PUIGDEFÁBREGAS, J. (2018). WORLD ATLAS OF DESERTIFICATION. In *World Atlas of Desertification* (tercera ed). <https://doi.org/10.2760/9205>
- DE LEÓN-GONZÁLEZ, F., FUENTES-PONCE, M. y PAYÁN-ZELAYA, F. (2011). Earthworms and Agricultural Systems Management: Emphasis on the Latin American Region. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 6(1), 14–26. https://www.academia.edu/24585079/Earthworms_and_Agricultural_Systems_Management_Emphasis_on_the_Latin_American_Region
- DERPSCH, R., & FRIEDRICH, T. (2009). Global overview of conservation agriculture adoption. *Proceedings of the 4th World Congress on Conservation Agriculture*, 429–438.

- DE OLIVEIRA, C. M., AFONSO, G. T., CAROLINO DE SÁ, M. A. y FRIZZAS, M. R. (2021). Diversity of soil arthropods in sugarcane in the Brazilian Cerrado: Influence of tillage systems, extraction methods, and sampling time. *European Journal of Soil Biology*, 103, 103274. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103274>
- DIEKMANN, L. O., ALVES, M. E., & DE SOUZA, D. M. (2021). Influence of spatial variability and land use on soil chemical properties. *Catena*, 202, 105274.
- DOMÍNGUEZ, A., ESCUDERO, H. J., RODRÍGUEZ, M. P., ORTIZ, C. E., AROLFO, R. V. y BEDANO, J. C. (2024). Agroecology and organic farming foster soil health by promoting soil fauna. *Environment, Development and Sustainability*, 26(9), 22061–22084. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02885-4>
- DRINKWATER, L. E., & SNAPP, S. S. (2007). Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy*, 92, 163–186. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92004-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92004-3)
- DUYCK, P.-F., LAVIGNE, A., VINATIER, F., ACHARD, R., OKOLLE, J. N. y TIXIER, P. (2011). Addition of a new resource in agroecosystems: Do cover crops alter the trophic positions of generalist predators? *Basic and Applied Ecology*, 12(1), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.11.009>
- FAO. (2017). *Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. ISBN 9789251098387.
- FAO, 2018. *Evaluación de los suelos volcánicos de Ecuador y su potencial productivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Quito, Ecuador. S.l.: FAO Ecuador.
- FAO. (2020). *Recarbonización de los suelos del mundo*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. In Alianza Mundial por el Suelo.
- FIELD, K., GABRIEL, R., GORKA, S., DIETRICH, M., MAYERHOFER, W. y GABRIEL, R., 2019. Rapid Transfer of Plant Photosynthates to Soil Bacteria via Ectomycorrhizal Hyphae and Its Interaction With Nitrogen Availability. , vol. 10, no. February, pp. 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00168>
- FIERER, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.8>
- FROUZ, J. (2018). Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 332, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.039>
- GAD PARROQUIAL CACHA. (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Cacha*. Límite político administrativo. Riobamba. Disponible en: <http://www.cacha.gob.ec/index.php/ct-menu-item-15/ct-menu-item-31>

- GAD PICHINCHA. (2012). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia La Merced 2012-2025*. Quito. Disponible en: <http://sitp.pichincha.gob.ec/repositorio/>
- GARCÍA-ORENES, F., MORUGÁN-CORONADO, A., ZORNOZA, R., & SCOW, K. (2013). Changes in soil microbial community structure influenced by agricultural management practices in a Mediterranean agro-ecosystem. *PLOS ONE*, 8(11), e80522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080522>
- GARCÍA-RUIZ, J. M., et al. (2013). Land degradation and soil conservation in European mountain environments. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-5354.
- GATTINGER, A., ET AL. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), 18226–18231. <https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109>
- GEORGE, P. B. L., KEITH, A. M., CREER, S., BARRETT, G. L., LEBRON, I., EMMETT, B. A., ROBINSON, D. A. y JONES, D. L. (2017). Evaluation of mesofauna communities as soil quality indicators in a national-level monitoring programme. *Soil Biology and Biochemistry*, 115, 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.022>
- GLIESSMAN, S. R. (2006). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17420>.
- GLIESSMAN, S. R. (2016). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1080/21683565.2016.1157719>
- GLIESSMAN, S. R., JEDLICKA, J., COHN, A., MENDEZ, V. E., COHEN, R., TRUJILLO, L. y BACON, C. (2007). Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Agroecología*, 16(1), 13–23.
- GÓMEZ, L. F., RÍOS-OSORIO, L. y ESCHENHAGEN, M. L. (2015). Las bases epistemológicas de la agroecología. *Epistemological Bases of Agroecology*, 49(6), 679–688.
- GUERRA, C. A., ET AL. (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Nature Sustainability*, 3, 845–853.
- HANEY, R. L., & HANEY, E. B. (2015). Estimating Potential Nitrogen Mineralisation Using the Solvita Soil Respiration System. *Open Journal of Soil Science*, 5(12), 319–323. <https://doi.org/10.4236/ojss.2015.512030>
- HIDROBO, J., PRAT, C., MORENO, J., & ORTEGA, C. A. (2015). Sierra Norte de Ecuador Production systems in areas with reclaimed cangahua soils in. *Siembra*, 2, 116–127. <https://doi.org/10.29166/siembra.v2i1.1444>
- HIJBEEK, R., ET AL. (2017). Do organic inputs matter? A meta-analysis of additional yield effects for different combinations of organic inputs and mineral fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 144–156.

HOFSTEDE, R. (2023). *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*. <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71>

INEC. (2016). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2016*. INEC.

JANGID, K., WILLIAMS, M. A., FRANZLUEBBERS, A. J., SCHMIDT, T. M., COLEMAN, D. C., & WHITMAN, W. B. (2011). Land-use history has a stronger impact on soil microbial community composition than aboveground vegetation and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(10), 2184–2193. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.06.022>

JIMENEZ MERINO, W., LOAYZA, V. y METZLER, E. (2018). Mapeo de cangahuas mediante teledetección en el Ecuador. *Siembra*, 5(1), 38–50. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1426>

JIMÉNEZ, W., LOAYZA, V. y METZLER, E. (2018). Mapping cangahua in Ecuador using remote sensing. *Siembra*, 5(1), 38–50. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1426>

JONES, J. B. JR. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>

LAL, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development*, 17(2), 197–209. <https://doi.org/10.1002/ldr.696>

LAL, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

LAL, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>

LAVELLE, P., MATHIEW, SPAIN, A., BROWN, G., FRAGOSO, C., LAPIED, E., DE AQUINO, A. (2022). Soil macroinvertebrate communities: A world-wide assessment. *Global Ecology and Biogeography*, 31(7), 1261–1276. <https://doi.org/10.1111/geb.13492>

LAUBER, C. L., HAMADY, M., KNIGHT, R., & FIERER, N. (2009). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(15), 5111–5120. <https://doi.org/10.1128/AEM.00335-09>

LICONA, L. S., & ESTUPIÑÁN, L. H. (2019). Barbecho como práctica cultural: una revisión histórica y alcances frente a la sostenibilidad. *Revista Luna Azul*, 49, 21–37. <https://www.redalyc.org/journal/3217/321767977006/html/>

LINDSAY, W. L., & NORVELL, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>

LORI, M., SYMNACZIK, S., MÄDER, P., DE DEYN, G., & GATTINGER, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLOS ONE*, 12(7), e0180442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>

- MÄDER, P., ET AL. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694–1697. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>
- MAMABOLO, E., PRYKE, J. S. y GAIGHER, R. (2024). Soil fauna diversity is enhanced by vegetation complexity and no-till planting in regenerative agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108973>
- MARAIS, A. y BOOYSE, M. (2024). Evaluation of the Microbiometer field test kit and other soil health indicators in three diferentes soils of the Western Cape Province. *South African Journal for Science and Technology*, 43(1), 102–113. <https://doi.org/10.36303/SATNT.2024.43.1.975E>
- MARINO, P. C. y LANDIS, D. A. (1996). Effect of landscape structure on parasitoid diversity and parasitism in agroecosystems. *Ecological Applications*, 6(1), 276–284. <https://doi.org/10.2307/2269571>
- MÉNDEZ, V., CASWELL, M., GLIESSMAN, S. y COHEN, R. (2017). Integrating Agroecology and Participatory Action Research (PAR): Lessons from Central America. *Sustainability*, 9(5), 705. <https://doi.org/10.3390/su9050705>
- MENTA, C. y REMELLI, S. (2020). Soil Health and Arthropods: From Complex System to Worthwhile Investigation. *Insects*, 11(1), 54. <https://doi.org/10.3390/insects11010054>
- MOREIRA, F., HUISING, E. J. y BIGNELL, D. E. (2008). *Tropical soil biology*. New York, NY: Taylor & Francis. ISBN 9781844076215
- MORIN, P. J. (2011). *Community ecology* (2nd ed.). New Jersey: Wiley-Blackwell. ISBN 9781444338218. <https://doi.org/10.1002/9781444341966>
- MORRISON, W. R., WALLER, J. T., BRAYSHAW, A. C., HYMAN, D. A., JOHNSON, M. R. y FRASER, A. M. (2012). Evaluating Multiple Arthropod Taxa as Indicators of Invertebrate Diversity in Old Fields. *Great Lakes Entomologist*, 45(1–2), 56–68. <https://doi.org/10.22543/0090-0222.2238>
- MUTAI, J. C., STEWART, J. E., MEDVECKY, B., DOBBS, J. T., VANEK, S. J., OJEM, J., CHEGE, G. y FONTE, S. J. (2024). Assessing performance of simplified bioassays for soil-borne pathogens in smallholder systems of western Kenya. *Frontiers in Plant Science*, 15(August), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1389285>
- MUTIO, J. M., KEBENEY, S., NJOROGI, R., CHURU, H., NG'ETICH, W., MUGAA, D., ALKAMOI, B. y WAMALWA, F. (2023). Effect of land rehabilitation measures on soil organic carbon fractions in semi-arid environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1095865>
- NELSON, D. W., & SOMMERS, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 539–579). ASA and SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>

NICHOLLS, C., ALTIERI, M., VÁZQUEZ, L., NICHOLLS, C., ALTIERI, M. y VÁZQUEZ MORENO, L. (2015). Agroecología: Principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Agroecología*, 10(1), 61–72.

NICKENS, P., ADER, D. y WALKER, F. (2024). Evaluating the usefulness and accuracy of the soil microbiometer® as a tool for extension and research in resource-constrained countries. *Soil Science*, 12(1), 4899.

NONI, G., TRUJILLO, G., VIENNOT, M. (1993). Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador. *Terra*, 10, 503–514.

OLSEN, S. R., COLE, C. V., WATANABE, F. S., & DEAN, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular No. 939*.

OREJUELA, I. F. P., HUERA, D. P. U. y VILLACRÉS, D. V. C. (2018). Identificación de Cangahuas para su recuperación mediante estudio multicriterio y constatación in situ en comunas del volcán Ilaló. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1). <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/cienciaytecnologia/article/view/649>

PALACIOS OREJUELA, I., USHÑA, D., & CARRERA-VILLACRÉS, D. (2021). Applied to the Mapping of Degraded Soils by the Presence of Cangahuas in the Ilaló Volcano, Ecuador. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11, 2121. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.5.14684>

PALM, C. A., GACHENGO, C. N., DELVE, R. J., CADISCH, G., & GILLER, K. E. (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1–2), 27–42. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00267-X)

PATTERSON, E. S. P., SANDERSON, R. A. y EYRE, M. D. (2019). Soil tillage reduces arthropod biodiversity and has lag effects within organic and conventional crop rotations. *Journal of Applied Entomology*, 143(4), 430–440. <https://doi.org/10.1111/jen.12603>

PESANTEZ, H. (2016). Protección, Conservación y manejo sostenible de los ecosistemas Institución.

PODWOJEWSKI, P., & GERMAIN, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 39–51. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00638.x>

PODWOJEWSKI, P., JANEAU, J. L. y LEROUX, Y. (2008). Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash–soil (Cangahua) in Ecuador. *CATENA*, 72(1), 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.003>

POVEDA, K. (2008). Agroecosystem management and its impact on soil macrofauna. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125(1–4), 54–64.

ROSAS-RAMOS, N., BAÑOS-PICÓN, L., TORMOS, J. y ASÍS, J. D. (2020). Natural enemies and pollinators in traditional cherry orchards: Functionally important taxa respond differently to

farming system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106920>

SCHRÖDER, P. (2008). Perspectives for Agroecosystem Management. San Diego: Elsevier, pp. 293–306. ISBN 978-0-444-51905-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044451905450012X>

SENICZAK, A., SENICZAK, S., ITURRONDOBEITIA, J. C., GWIAZDOWICZ, D. J., WALDON-RUDZIONEK, B., FLATBERG, K. I. y BOLGER, T. (2022). Mites (Oribatida and Mesostigmata) and vegetation as complementary bioindicators in peatlands. *Science of the Total Environment*, 851(March). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158335>

SIX, J., CONANT, R. T., PAUL, E. A., & PAUSTIAN, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

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>

SOKOL, N. W., SLESSAREV, E., MARSCHMANN, G. L., NICOLAS, A., BLAZEWICZ, S. J. (2022). Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. *Nature Reviews Microbiology*, 20(7), 415–430. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00695-z>

STRICKLAND, M. S., & ROUSK, J. (2010). Considering fungal:bacterial dominance in soils – Methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1385–1395. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.05.007>

STROUD, J. L. (2019). Soil health pilot study in England: Outcomes from an on-farm earthworm survey. *PLOS ONE*, 14(2), e0203909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203909>

TABATABAI, M. A. (1974). Determination of sulfate in water samples. *Soil Science Society of America Journal*, 38(3), 539–541. <https://doi.org/10.1080/00139307409437403>

THOMAS, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 475–490). SSSA Book Series No. 5. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>

TIBBETT, M., GIL-MARTÍNEZ, M., FRASER, T. (2019). Long-term acidification of pH neutral grasslands affects soil biodiversity, fertility and function in a heathland restoration. *Catena*, 180, 401–415. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.013>

TITTONELL, P. (2020). Assessing resilience and adaptability in agroecological transitions. *Agricultural Systems*, 184, 102862. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102862>

TITTONELL, P., MURIUKI, A., KLAPWIJK, C. J., SHEPHERD, K. D., COE, R., & VANLAUWE, B. (2012). Soil heterogeneity and soil fertility gradients in smallholder farms of the East African highlands. *Soil Science Society of America Journal*, 76(4), 1310–1321.

- TOLEDO, V. M., & BARRERA-BASSOLS, N. (2008). *La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Icaria Editorial.
- TRIPLEHORN, C. A. AND JOHNSON, N. F. (2004). *Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects*. 7th Edition, Brooks Cole, Pacific Grove.
- VISSCHER, A. M., CHAVEZ, E., CAICEDO, C., TINOCO, L. y PULLEMAN, M. (2024). Biological soil health indicators are sensitive to shade tree management in a young cacao (*Theobroma cacao* L.) production system. *Geoderma Regional*, 37, e00772. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00772>
- WALL, D. H., NIELSEN, U. N., & SIX, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580), 69–76. <https://doi.org/10.1038/nature15744>
- WALTER, D. E. & PROCTOR, H. (2013). *Mites: Ecology, Evolution and Behaviour: Life at a Microscale*. 2nd Edn, Springer, 494 pp. ISBN: 978-94-007-7163-5. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7164-2>
- WEZEL, A., CASAGRANDE, M. y CELETTE, F. (2013). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
- ZEBROWSKI, C. (1996). Los suelos con cangahua. 128–137.
- ZEBROWSKI, C., QUANTIN, P. y TRUJILLO, G. (1997). *Suelos Volcánicos Endurecidos*. Quito, Ecuador: Impresora Polar, pp. 529.

Anexos

Anexo 1. Valores promedio de las variables químicas del capítulo 1.

Zona	Tipo de manejo	pH (Prom)	N (Prom)	P (Prom)	S (Prom)	B (Prom)	K (Prom)	Ca (Prom)	Mg (Prom)	Zn (Prom)	Cu (Prom)	Fe (Prom)	Mn (Prom)	Arena (Prom)	Limo (Prom)	Arcilla (Prom)
Cacha	Agroecológico	7,49	25,41	92,99	8,21	0,30	2,54	17,36	8,25	4,07	9,63	72,00	5,34	37,67	37,67	24,67
Cacha	Barbecho	7,44	47,80	106,64	12,41	0,39	2,24	18,57	7,14	6,30	10,00	95,67	11,47	39,67	39,00	21,33
Cacha	Tradicional	7,29	43,25	62,08	7,04	0,25	1,60	19,99	7,87	2,81	8,83	55,33	8,78	37,67	37,67	24,67
Cacha	Ecosistema degradado	8,05	11,59	6,26	6,32	0,11	1,02	17,77	6,12	1,27	7,90	19,00	3,17	39,00	39,67	21,33
La Merced	Agroecológico	7,1	58,5	163,1	16,4	0,6	1,7	16,9	4,5	14,3	7,1	192,7	24,5	53,7	33,3	13,0
La Merced	Barbecho	6,8	39,0	64,1	10,1	0,3	1,1	9,9	3,4	5,2	10,0	227,0	16,6	51,7	30,7	17,7
La Merced	Tradicional	6,9	62,0	133,0	14,1	0,5	1,3	14,7	4,4	13,4	9,7	202,7	24,8	49,0	32,7	18,3
La Merced	Degradado	7,2	8,0	8,7	10,3	0,2	0,9	14,8	4,3	2,0	12,6	23,3	2,8	45,0	14,3	40,7

Anexo 2. Valores mínimos de las variables químicas del capítulo 1.

Zona	Tipo de manejo	pH (min)	N (min)	P (min)	S (min)	B (min)	K (min)	Ca (min)	Mg (min)	Zn (min)	Cu (min)	Fe (min)	Mn (min)	Arena (min)	Limo (min)	Arcilla (min)
Cacha	Agroecológico	7,18	14,42	5,52	2,98	0,13	1,72	13,10	5,42	0,11	8,80	16,00	0,22	35,00	33,00	22,00
Cacha	Barbecho	6,93	41,42	46,84	11,62	0,28	1,63	15,88	6,04	4,30	8,80	74,00	6,60	39,00	35,00	18,00
Cacha	Tradicional	6,82	15,87	4,31	3,78	0,09	1,29	16,07	5,74	0,12	8,20	14,00	0,23	33,00	35,00	22,00
Cacha	Ecosistema degradado	7,67	10,80	4,60	5,82	0,08	0,94	14,94	3,63	0,30	5,60	12,00	0,40	39,00	35,00	16,00
La Merced	Agroecológico	6,87	43,66	129,26	13,32	0,48	0,79	12,50	3,35	9,20	5,20	113,00	22,80	49,00	30,00	9,00
La Merced	Barbecho	6,71	25,99	40,13	8,33	0,26	0,69	7,32	2,25	4,50	7,90	142,00	13,50	43,00	22,00	15,00
La Merced	Tradicional	6,49	40,33	64,06	12,63	0,40	0,89	11,12	3,08	11,20	8,80	122,00	15,90	47,00	30,00	15,00
La Merced	Degradado	6,49	5,60	8,50	6,34	0,17	0,80	14,17	3,63	1,20	10,60	12,00	0,80	41,00	13,00	36,00

Anexo 3. Valores máximos de las variables químicas del capítulo 1.

Zona	Tipo de manejo	pH (máx)	N (máx)	P (máx)	S (máx)	B (máx)	K (máx)	Ca (máx)	Mg (máx)	Zn (máx)	Cu (máx)	Fe (máx)	Mn (máx)	Arena (máx)	Limo (máx)	Arcilla (máx)
Cacha	Agroecológico	8,06	37,52	191,62	14,15	0,47	3,24	21,96	11,53	8,80	10,30	135,00	8,00	39,00	43,00	28,00
Cacha	Barbecho	8,24	55,27	178,62	13,49	0,46	2,75	20,93	8,16	8,30	11,40	112,00	14,10	41,00	43,00	24,00
Cacha	Tradicional	7,96	68,88	141,82	8,77	0,37	1,87	26,60	10,72	5,10	9,20	88,00	18,90	41,00	41,00	26,00
Cacha	Ecosistema degradado	8,60	12,00	8,58	6,80	0,15	1,12	21,87	8,04	2,00	10,00	30,00	6,60	39,00	45,00	26,00
La Merced	Agroecológico	7,19	76,16	223,09	22,17	0,89	2,91	19,81	6,26	19	8,7	239	27,2	61	36	15
La Merced	Barbecho	6,86	61,34	80,94	12,16	0,32	1,75	12,95	5,33	6,3	13,4	348	20,2	63	38	19
La Merced	Tradicional	7,39	77,09	237,01	16,91	0,59	2,1	17,29	6,04	17,5	11,5	334	32,2	53	36	23
La Merced	Ecosistema degradado	7,7	12	9,04	13,11	0,18	0,94	15,2	5,52	3	15,5	43	6,6	51	15	44

Anexo 4. Valores promedio, mínimos y máximos de la abundancia de lombrices por cada zona y tipo de manejo del capítulo 2.

ZONA	TIPO DE MANEJO	Abundancia Lombrices Promedio	Abundancia Lombrices min	Abundancia Lombrices Max
Cacha	Agroecológico	16,0	3	37
Cacha	Barbecho	1,4	0	6
Cacha	Tradicional	13,8	2	34
Cacha	Ecosistema degradado	0,0	0	0
La Merced	Agroecológico	12,7	5	16
La Merced	Barbecho	27,2	19	35
La Merced	Tradicional	8,7	7	10
La Merced	Ecosistema degradado	0	0	0

Anexo 5. Valores promedio, mínimos y máximos de la abundancia de los artrópodos por cada zona y tipo de manejo del capítulo 2.

Zona	Tipo de manejo	Abundancia (Promedio)	Abundancia (Min)	Abundancia (Max)
Cacha	Agroecológico	38,0	11	73
Cacha	Barbecho	34,9	8	72
Cacha	Tradicional	25,3	2	63
Cacha	Ecosistema degradado	14,0	1	30
La Merced	Agroecológico	31,9	17	53
La Merced	Barbecho	54,2	42	76
La Merced	Tradicional	18,7	5	37
La Merced	Ecosistema degradado	5,3	0	15

Anexo 6. Valores promedio de las variables de microbiomasa, hongos y bacterias del capítulo 2

Zona	Tipo de manejo	Microbiomasa ug C/g (prom)	F:B (prom)	F (prom)	B (prom)
Cacha	Agroecológico	324,8	0,6	36,8	63,2
Cacha	Barbecho	320,6	0,6	37,1	62,9
Cacha	Tradicional	438,8	0,8	44,0	56,0
Cacha	Ecosistema degradado	393,4	0,7	40,3	59,7
La Merced	Agroecológico	855,1	1,6	59,0	41,0
La Merced	Barbecho	645,8	1,2	53,6	46,4
La Merced	Tradicional	890,3	1,7	57,6	42,4
La Merced	Degradado	369,8	0,6	39,6	64,2

Anexo 7. Valores mínimos de las variables de microbiomasa, hongos y bacterias del capítulo 2

Zona	Tipo de manejo	Microbiomasa ug C/g (min)	F:B (min)	F (min)	B (min)
Cacha	Agroecológico	205	0,4	28	47
Cacha	Barbecho	207	0,4	28	53
Cacha	Tradicional	231	0,4	30	41
Cacha	Ecosistema degradado	233	0,4	30	49
La Merced	Agroecológico	409	0,8	44	24
La Merced	Barbecho	474	0,8	44	32
La Merced	Tradicional	356	0,5	33	19
La Merced	Degradado	230	0,4	29	60

Anexo 8. Valores máximos de las variables de microbiomasa, hongos y bacterias del capítulo 2

Zona	Tipo de manejo	Microbiomasa ug C/g (máx)	F:B (máx)	F (máx)	B (máx)
Cacha	Agroecológico	575	1,1	53	72
Cacha	Barbecho	464	0,9	47	72
Cacha	Tradicional	776	1,4	59	70
Cacha	Ecosistema degradado	568	1	51	70
La Merced	Agroecológico	1398	3,1	76	56
La Merced	Barbecho	1017	2,1	68	56
La Merced	Tradicional	2011	4,3	81	67
La Merced	Degradado	488	1	51	70

Anexo 9. Valores promedio de las variables de materia orgánica, carbono del suelo y descomposición del capítulo 3.

Zona	Tipo de manejo	% MO (promedio)	% COS (promedio)	Tasa de descomposición TE VERDE (Promedio)	Tasa de descomposición TE ROIBOSS (Promedio)	Respiración: ppm CO2 (Promedio)	Estabilidad Agregados (Promedio)
Cacha	Agroecológico	13,23	7,67	0,04	0,02	17,72	0,73
Cacha	Barbecho	10,45	6,06	0,04	0,02	15,39	0,60
Cacha	Tradicional	8,66	5,02	0,04	0,02	14,89	0,59
Cacha	Ecosistema degradado	6,63	3,85	0,01	0,01	4,83	0,24
La Merced	Agroecológico	12,05	6,99	0,05	0,03	49,94	0,73
La Merced	Barbecho	10,19	5,91	0,05	0,02	24,06	0,71
La Merced	Tradicional	9,00	5,22	0,05	0,02	54,72	0,66
La Merced	Degradado	4,64	2,69	0,02	0,01	8,90	0,39

Anexo 10. Valores mínimos de las variables de materia orgánica, carbono del suelo y descomposición del capítulo 3.

Zona	Tipo de manejo	% MO (mínimo)	% COS (mínimo)	Tasa de descomposición TE VERDE (mínimo)	Tasa de descomposición TE ROIBOSS (mínimo)	Respiración:ppm CO2 (mínimo)	Estabilidad Agregados (mínimo)
Cacha	Agroecológico	12,21	7,08	0,03	0,01	6,50	0,69
Cacha	Barbecho	8,65	5,02	0,02	0,01	6,50	0,52
Cacha	Tradicional	7,04	4,08	0,02	0,01	12,00	0,52
Cacha	Ecosistema degradado	6,56	3,80	0,01	0,01	1,50	0,21
La Merced	Agroecológico	10,57	6,13	0,03	0,02	12,00	0,63
La Merced	Barbecho	8,74	5,07	0,03	0,01	12,00	0,53
La Merced	Tradicional	7,38	4,28	0,03	0,01	28,50	0,49
La Merced	Degradado	4,57	2,65	0,02	0,01	8,30	0,37

Anexo 11. Valores máximos de las variables de materia orgánica, carbono del suelo y descomposición del capítulo 3.

Zona	Tipo de manejo	% MO (máximo)	% COS (máximo)	Tasa de descomposición TE VERDE (máximo)	Tasa de descomposición TE ROIBOSS (máximo)	Respiración:ppm CO2 (máximo)	Estabilidad Agregados (máximo)
Cacha	Agroecológico	14,85	8,61	0,06	0,04	28,50	0,79
Cacha	Barbecho	11,48	6,66	0,06	0,03	28,50	0,65
Cacha	Tradicional	11,86	6,88	0,05	0,03	18,50	0,74
Cacha	Ecosistema degradado	6,78	3,93	0,02	0,01	6,50	0,26
La Merced	Agroecológico	13,36	7,75	0,06	0,04	105,50	0,89
La Merced	Barbecho	11,72	6,80	0,06	0,04	45,00	0,87
La Merced	Tradicional	11,66	6,76	0,06	0,03	105,50	0,93
La Merced	Degradado	4,78	2,77	0,02	0,01	10,10	0,41