

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSERVACIÓN



Análisis del sistema milpa intercalado con árboles frutales (MIAF)

PROYECTO DE TESIS

Presentado como requisito parcial previo a la realización del trabajo de
investigación

POR:

JONATHAN FRANCISCO CUELLO MARTINEZ

Catacamas, Olancho

SEPTIEMBRE 25

Presentado como requisito parcial previo a la realización del trabajo de
investigación

Por:

Jonathan Francisco Cuello Martínez

Josué David Matute, M. Sc

Director de tesis

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

**INGENIERO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS
NATURALES**

Catacamas, Olancho

Septiembre del 2024

DEDICATORIA

PRIMERAMENTE, A DIOS TODO PODEROSO

Por brindarme la fortaleza, la oportunidad de vivir esta experiencia enriquecedora y llena de aprendizajes, así como por concederme salud en cada momento y permitirme acercarme cada vez más al cumplimiento de una de mis metas más importantes.

A MI PADRE

JOSÉ FRANCISCO PORTILLO

Por su apoyo inquebrantable, sus palabras de ánimo que siempre me han guiado a ser mejor, y por inculcarme valores fundamentales para enfrentar cualquier desafío en la vida. Su esfuerzo y dedicación son mi mayor ejemplo de perseverancia.

A MIS ABUELOS

FRANCISCA PORTILLO PALOMO Y JESÚS CUELLO VÁZQUEZ

Por todo lo que han hecho por mí a lo largo de mi vida. Su cariño, comprensión y enseñanzas son un legado invaluable que siempre atesoraré.

A MI TÍA

FÁTIMA DOLORES CUELLO PORTILLO

Por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo y consejos en los momentos más importantes de mi vida. Su compañía y afecto han sido esenciales para alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, quien guía mis pasos y me da la fortaleza para alcanzar mis objetivos.

A mi padre **José Francisco Portillo**, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida, brindándome siempre su amor, confianza y respaldo.

A mis abuelos **Francisca Portillo Palomo** y **Jesús Cuello Vázquez**, así como a toda mi familia, por estar a mi lado en cada paso de este proceso.

A mi alma mater, la **Universidad Nacional de Agricultura**, por permitirme formarme profesionalmente y completar mis estudios universitarios.

Mi gratitud especial a mis asesores de tesis, el MSc. Carlos Irías, MSc. Emilio Fuentes y MSc. Josué Matute, por su dedicación, orientación y valiosa amistad durante la realización de este trabajo tanto en el campo como en la redacción del documento.

A mis compañeros del **cuarto 45**, especialmente a **Pablo Flores**. También a **Milton Reyes, Fernando Valladares, Fabricio Amador, el profesor Flavio y Óscar Godoy**, quienes me brindaron su apoyo, amistad y compañía a lo largo de esta etapa.

A MI NOVIA

MARY GISSELL GUZMAN

Por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante todo este proceso. Su compañía ha sido un motor constante para alcanzar mis objetivos.

A UN AMIGO ESPECIAL

LESEM RODRÍGUEZ

Por su amistad sincera y apoyo constante. Su confianza en mí ha sido una motivación para superar cada desafío.

CONTENIDO

ii. Introducción	3
III. Objetivos.....	4
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos.....	4
IV. Marco Teórico.....	5
4.1. Corredor seco	5
4.2. Análisis de sistema de producción en el corredor seco	5
4.3. Sistemas de producción alternativos para el corredor seco	5
4.4. Sistema milpa intercalado con árboles frutales	6
4.5. Agroforestería como enfoque de integración de árboles en sistemas agrícolas.	6
4.6. Importancia de los Diseños y Arreglos del Sistema MIAF	7
4.7. Antecedentes y evolución del sistema MIAF	7
4.7.1. Historia y evolución de MIAF	7
4.8. Beneficios de la milpa	8
4.8.1. Diversidad de cultivo.....	8
4.8.2. Árboles Frutales en el Sistema	9
4.8.3. Aumento de la productividad	9
4.8.4. Sostenibilidad ambiental y económica	9
4.9. Ecosistema de la Milpa Intercalada con Árboles Frutales.....	10
4.9.1. Exploración de los principales cultivos de milpa y sus propiedades.....	10
4.9.2. Selección y características de los árboles frutales intercalados.....	11
4.10. Interacciones Ecológicas	11
4.10.1. Mutualismo entre cultivos y árboles frutales.....	11
4.10.2. Competencia y facilitación en el ecosistema	12

4.11.	Ciclos y Flujo de Nutrientes.....	13
4.11.1.	Ciclos de nutrientes en el sistema milpa-agroforestal.	13
4.11.2.	Uso eficiente de recursos y reciclaje de nutrientes.....	13
4.12.	Variables Ecológicas Evaluadas en Sistemas Agroforestales	14
4.13.	Importancia del Análisis de Variables Ecológicas	14
4.14.	Importancia del Análisis de Variables Ecológicas	14
4.15.	Gestión y Prácticas Agrícolas.....	15
4.15.1.	Técnicas ancestrales de cultivo de milpa.....	15
4.15.2.	Conocimientos indígenas y su relevancia.....	15
4.16.	Tecnologías y Prácticas Modernas	16
4.16.1.	Métodos de cultivo y manejo de árboles frutales en sistemas intercalados. 16	
4.16.2.	Herramientas y tecnologías agrícolas actuales.	17
4.17.	Impacto Socioeconómico y Ambiental	17
4.17.1.	Efectos del sistema en la conservación de suelos, agua y biodiversidad. 17	
4.17.2.	Seguridad Alimentaria y Desarrollo Comunitario.....	18
4.17.3.	Rol del sistema en la seguridad alimentaria de comunidades locales.	18
4.17.4.	Valor nutricional de los productos obtenidos.....	18
5.	MATERIALES Y METODOS.....	16
5.1.	Descripción del área de estudio.....	16
5.2.	Materiales y equipo	17
5.3.	Enfoque metodológico	17
5.4.	Fase 1 Creación del diseño e implementación del mismo.	17
5.4.2.	Dialogo semiestructurado.....	18
5.4.6.	Cálculo del Potencial de Esguerrimiento de la Parcela.....	24
5.4.7.	Diseño del sistema.....	26
5.4.8.	Capacidad de recolección de agua de los canales o líneas claves	26
5.4.9.	Diseño y arreglo de parcela de complejidad	26

5.4.10. Hoyado	29
5.4.11. Siembra y Trasplante.....	30
5.4.12. Manejo agroecológico	32
5.5. Fase 2 Comparación de variables agroecológicas.....	35
5.5.1. Cobertura del suelo.....	35
5.6 Fase 3 Evolución de la salud de las plantas según fase fenológicas	36
5.6.1. Medir los niveles de grados brix	36
5.7. Fase 4 variables físicas, químicas y biológicas del suelo.....	38
5.7.1. Muestreo de Suelo	38
5.7.2. Análisis de suelo físico.....	38
5.7.3. Variables químico del suelo	39
5.7.3. Variables biológicas del suelo	41
6. Resultados y discusiones	43
6.1. Etapa 1. Creación del diseño e implementación del mismo.....	43
6.1.1. Tipo de suelo	43
6.1.2. Mapa de uso del suelo	43
6.1.3. Vegetación.....	44
6.1.4. Origen de las especies	45
6.1.5. Identificación de especies.....	45
6.1.6. Descripción de los cultivos integrados.....	52
6.1.7. Mapa de red hídrica.....	53
6.1.8. Precipitación.....	54
6.1.9. Pendiente y curvas a nivel	56
6.1.10. Potencial de Escurrimiento de la Parcela	57
6.1.11. Diagrama de flujo del sistema MIAF	58
6.1.12. Croquis del sistema	59
6.1.13. Enfoque de sistema.....	60
6.1.14. Principio Keyline.....	60

6.1.15. Movimiento del agua.....	61
6.1.16. Capacidad de recolección de agua en los canales o líneas claves.	63
6.1.17. Diseño del sistema MIAF.....	64
6.2. Etapa 2. Medir variables agroecológicas en sistema milpa intercalado con	66
6.2.1. Análisis de cobertura.....	66
6.2.2. Análisis de cobertura por especie.....	68
6.3. Etapa 3. Medir la salud de los frutales de acuerdo a su estado fenológico	69
6.3.1. Análisis de grados brix en los limones (<i>Citrus limon</i>).....	69
6.4. Etapa 4. Evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	73
6.4.1. Análisis de textura.....	73
6.4.2. Análisis químico.....	74
7. CONCLUSIONES.....	81
8. RECOMENDACIONES	83
9. Bibliografía.....	61
10. ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Paso y procedimientos de la implementación de las líneas claves.....	22
Tabla 2. parámetros para el cálculo del Potencial de Esguimiento de la Parcela	25
Tabla 3. Arreglo de parcela de complejidad.....	27
Tabla 4. Elaboracion de insumos organicos.	32
Tabla 5. Paso para los nuestros de cobertura del suelo.	35
Tabla 6. Tabla de especies para el muestreo de cobertura.....	35
Tabla 7. Procedimiento de muestro para análisis biológico	41
Tabla 8. Tabla de identificación de especies frutales en Lauterique, La Paz.	46
Tabla 9. Tabla de identificación de especies de hortalizas en Lauterique, La Paz.....	47
Tabla 10. Tabla de identificación de especies medicinales, aromáticas y condimentos en Lauterique, La Paz.....	48
Tabla 11. Tabla de identificación de especies de gramíneas en Lauterique, La Paz.....	49
Tabla 12. Descripción de los cultivos utilizados en el MIAF	52
Tabla 13. Promedio de precipitaciones del 2000 a 2019	54
Tabla 14. Datos de los grados brix en los frutos de limón (Citrus limón).....	69
Tabla 15. Resultado de los nutrientes evaluado en el laboratorio de la universidad nacional de agricultura.	74
Tabla 16. Análisis de la macrofauna edáfica encontrada en la parcela del establecimiento del sistema MIAF y un área natural	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Lauterique.	16
Figura 2. Mapa de las zonas visitadas en el municipio de Lauterique.	20
Figura 3. Delimitación del área para la implementación de sistema MIAF.	21
Figura 4. Limpieza del área para la implementación de sistema MIAF.	22
Figura 5. Imagen de las líneas claves en el la pendiente (Grass, 2012)	24
Figura 6. Establecimiento de las líneas claves para la elaboración de las zanjas.	24
Figura 7. Propuesta de diseño del MIAF	28
Figura 8. Elaboración de hoyos para la plantación de los frutales.	30
Figura 9. Trasplantes de los frutales ya establecidos.	32
Figura 10. Elaboración de insumos orgánicos.	34
Figura 11. Esquema de muestro para la extracción de sabia.	37
Figura 12. Imagen del triángulo textural de la USDA.	39
Figura 13. Mapa de uso de suelos del municipio Lauterique, La Paz.	44
Figura 14. Gráfico del origen de las especies identificadas en el municipio de Lauterique, La Paz.	45
Figura 15. Gráfico de las familias botánicas con potencial alimenticio más representativas en la zona.	51
Figura 16. Mapa de la red hídrica de Lauterique, La Paz.	53
Figura 17. Precipitaciones anuales de la zona de Lauterique (Giovanni, 2019)	55
Figura 18. Mapa de pendiente y curvas a nivel en el área de estudio.	57
Figura 19. Diagrama de flujo de la parcela donde se estableció el sistema MIAF	58
Figura 20. Mapa de los diferentes componentes de la zona en estudio en Lauterique, La Paz.	59
Figura 21. Mapa del diseño hidrológico Keyline en la parcela de establecimiento del sistema MIAF	60
Figura 22. Mapa del movimiento natural del agua en la parcela de establecimiento del Sistema MIAF y alrededores.	61
Figura 23. Diseño del sistema MIAF en conjunto con los elementos físicos y obras en el relieve a escala dentro del sitio en estudio	64

Figura 24. Gráfico de los arvenses más dominantes en el sistema MIAF.....	68
Figura 26. Grafica de porcentaje de grados brix de acuerdo al tiempo.	71
Figura 27. Gráfico de comparación de la textura de suelo en el sistema MIAF y un área natural en el municipio de Lauterique, La Paz.	73

I. RESUMEN

El sistema Milpa Intercalado con Árboles Frutales (MIAF) representa una estrategia agroforestal clave para optimizar el uso del suelo y enfrentar los desafíos agroclimáticos en el corredor seco de Honduras, específicamente en Lauterique, La Paz. Este sistema combina cultivos tradicionales como maíz y frijol con árboles frutales, mejorando la sostenibilidad de la agricultura local. El presente estudio se centra en la implementación del sistema MIAF en dos comunidades de Lauterique y en su capacidad para mitigar la erosión del suelo, mejorar la fertilidad y conservar el agua en zonas con escasez hídrica y suelos degradados. El estudio utilizó una metodología mixta que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas. Se empleó la Investigación-Acción Participativa (IAP) para involucrar a las comunidades locales en el diseño e implementación del sistema. Se realizaron diálogos semiestructurados y observación de campo para recopilar datos sobre las prácticas agrícolas locales. Las fases metodológicas incluyeron el diseño del sistema MIAF, donde se realizó un análisis detallado del terreno, identificando las curvas de nivel, pendiente y movimiento natural del agua. Se diseñaron zanjas de infiltración y se establecieron hileras de cultivos y frutales intercalados, como Citrus limon, Citrullus lanatus, y Musa paradisiaca, adaptados a las condiciones edafoclimáticas locales. Se midió la cobertura del suelo, la salud de los frutales en diferentes etapas fenológicas y se analizaron las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Se usó un refractómetro para determinar los grados Brix en los limones como indicador de la salud nutricional de las plantas. Además, se realizaron análisis de textura (arena, limo y arcilla) y de composición química (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, entre otros), utilizando la solución extractora Mehlich III. También se calculó el índice de Shannon para evaluar la biodiversidad del suelo. El sistema MIAF mostró resultados prometedores en cuanto a la conservación del suelo y la mejora de la fertilidad. Se observó una mejora en la retención de agua y una reducción significativa en la erosión del suelo gracias a las zanjas de infiltración y el diseño en curvas a nivel. Los análisis del suelo revelaron un incremento en la materia orgánica y una mejor disponibilidad de micronutrientes, como el zinc, en los suelos donde se implementó el MIAF, lo que contribuyó a una mayor productividad de los cultivos. Los resultados indicaron un aumento en los grados Brix en los limones, lo que sugiere una mejora en la salud y calidad de los frutales intercalados.

Además, se documentó una mayor diversidad de cultivos y una mejor gestión de los recursos hídricos en comparación con las prácticas agrícolas tradicionales. El sistema MIAF es una alternativa viable y sostenible para mejorar la productividad agrícola y la conservación de los recursos naturales en el corredor seco de Honduras. La implementación de zanjas de infiltración y la integración de árboles frutales en cultivos

tradicionales contribuyen significativamente a la conservación del suelo, la eficiencia en el uso del agua y la diversificación de ingresos para las comunidades locales. Se recomienda ampliar su aplicación en otras zonas del corredor seco para mejorar la seguridad alimentaria y la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático.

Palabras clave: Sistema MIAF, agroforestería, conservación de suelo, corredor seco, fertilidad del suelo, grados Brix, líneas claves.

II. INTRODUCCIÓN

En la comunidad de Lauterique, ubicada en la zona sur de Honduras, se ha identificado una subutilización de recursos naturales disponibles en la zona tiene alto potencial de material orgánico tales como materia seca, estiércol de vaca, estiércol de gallina, y otros materiales orgánicos. Esta falta de aprovechamiento limita el potencial de productividad agrícola y por ende la buena gestión de suelo (García et al., 2019).

La zona sur de Honduras, incluida Lauterique, forma parte del corredor seco, caracterizado por temperaturas altas y prolongadas épocas calurosas, seguidas de intensas precipitaciones. Esta combinación climática, junto con las características montañosas de la región, que incluye grandes laderas, ha llevado a un grave problema de erosión del suelo, con la pérdida de capas fértiles esenciales para la agricultura sostenible (Ramírez & López, 2020). La erosión del suelo no solo disminuye la productividad agrícola, sino que también afecta negativamente la seguridad alimentaria y la economía local.

Una de las alternativas más prometedoras para enfrentar los problemas mencionados es la preparación e incorporación de insumos orgánicos en el suelo. El uso de biofertilizantes orgánicos y técnicas como el bocashi ha demostrado ser efectivo en mejorar la fertilidad del suelo, reducir las malezas, y aumentar la retención de agua en el suelo. Diversos estudios han mostrado que estos métodos pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad agrícola y a la mejora de la calidad del suelo (Martínez et al., 2018).

El diseño Keyline también es uno de los factores principales ya que este promueve la infiltración eficiente del agua mediante la creación de zanjas y la mejora del suministro hídrico, se presenta como otra solución viable (Pérez & González, 2017). Además, los sistemas agroforestales, como los cultivos intercalados o sistemas sintrópicos, no solo ayudan a retener el suelo, sino que también previenen la erosión al integrar cultivos en curvas a nivel (Hernández & Morales, 2016). Estos sistemas agroforestales en laderas han sido implementados con éxito en diversas regiones con condiciones similares,

demonstrando su efectividad en la reducción de la erosión y la mejora de la productividad agrícola.

El Sistema de Milpa Intercalado con Árboles Frutales (MIAF) es una estrategia agroforestal que combina la producción de maíz, frijol y árboles frutales en un mismo espacio, optimizando el uso del suelo en tiempo y espacio. Este sistema no solo maximiza la producción agrícola, sino que también contribuye a la conservación del suelo y al mejoramiento de la fertilidad del mismo.

El MIAF se presenta como una solución prometedora para los problemas de erosión del suelo y subutilización de recursos en Lauterique. Al incorporar prácticas agroecológicas y el uso de insumos orgánicos, el MIAF puede mejorar la sostenibilidad de la agricultura local, aumentar la seguridad alimentaria y generar beneficios económicos adicionales para la comunidad (Turrent Fernández et al., 2017).

.

III. OBJETIVOS

1.1.Objetivo general

- Analizar el sistema MIAF milpa intercalado con árboles frutales en dos comunidades de Lauterique, La Paz.

1.2.Objetivos específicos

- Diseñar el sistema MIAF en contraste con el conocimiento local y la fundamentación conceptual establecida.
- Evaluar variables agroecológicas del territorio para optimizar el manejo sostenible de la parcela.
- Evaluar la salud de las plantas en función de su estado de desarrollo.
- Analizar variables físicas, químicas y biológicas del suelo en el sistema milpa intercalado con árboles frutales (MIAF).

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. Corredor seco

El Corredor Seco de América Central (CADC) es una región que ha ganado atención debido a sus crecientes desafíos relacionados con la sequía y la variabilidad climática. Este corredor, que abarca partes significativas de Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua, alberga aproximadamente 11 millones de personas, muchas de las cuales dependen de la agricultura para su sustento. La delimitación dinámica del CADC, basada en índices de sequía y valores de aridez, revela la complejidad de los patrones de precipitación y las características de la sequía en esta región, lo que subraya la importancia de estrategias agrícolas resilientes al clima (Alfaro, 2019).

4.2. Análisis de sistema de producción en el corredor seco

Los sistemas de producción en el Corredor Seco, basados principalmente en la agricultura de subsistencia, enfrentan desafíos críticos debido a la sequía y la degradación del suelo. Las prácticas tradicionales han resultado insuficientes frente a la creciente variabilidad climática. Para mejorar la resiliencia, se han implementado sistemas agroforestales y el uso de variedades de cultivos resistentes a la sequía. Estas estrategias, aunque efectivas, todavía tienen una adopción limitada debido a la falta de acceso a recursos y conocimientos técnicos por parte de los agricultores (Castellanos et al., 2022).

4.3. Sistemas de producción alternativos para el corredor seco

En el Corredor Seco de América Central, se han implementado sistemas de producción alternativos para mejorar la resiliencia frente a la sequía y la degradación del suelo. Prácticas como la agroforestería y los sistemas silvopastoriles, que combinan árboles con

cultivos y ganadería, han demostrado ser efectivas para conservar la biodiversidad y mejorar la fertilidad del suelo. Además, la captación y almacenamiento de agua de lluvia son esenciales para asegurar la disponibilidad de agua durante las temporadas secas, permitiendo mantener la productividad agrícola (USDA & CATIE, 2019).

4.4. Sistema milpa intercalado con árboles frutales

El sistema MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) es un enfoque agroforestal que combina la siembra de maíz, frijol y calabaza (la milpa) con árboles frutales. Este sistema ha sido utilizado como una alternativa para las pequeñas unidades de producción campesina y étnica, y busca promover la sustentabilidad y la diversificación de cultivos (Castellanos 2017).

La milpa es un sistema tradicional de policultivo que ha sido practicado por comunidades indígenas durante siglos. Al incorporar árboles frutales a la milpa, el sistema MIAF busca aprovechar los beneficios de la agroforestería, como la conservación del suelo, la diversificación de productos y la generación de ingresos adicionales (Ordoñez 2021).

4.5. Agroforestería como enfoque de integración de árboles en sistemas agrícolas.

Estos sistemas nacieron por la búsqueda del balance entre lo agrícola, pecuario y forestal, con el fin de que estos sistemas mantuvieran el ciclo de nutrientes, evitara perdida por lixiviados y que redujeran los espacios de producción para asegura una buena cobertura del suelo, evitando así la erosión

La agroforestería es un enfoque que busca integrar árboles en sistemas agrícolas con el objetivo de aprovechar los beneficios que estos pueden brindar a la producción agrícola y forestal .Este enfoque promueve la agricultura sostenible al combinar la siembra de cultivos y árboles forestales, junto con prácticas de conservación del suelo La integración de árboles en los sistemas agrícolas a escala masiva puede generar diversos beneficios, como la mejora de la fertilidad del suelo, la protección contra la erosión, la diversificación de productos y la generación de ingresos adicionales(Mao et al. 2000).

La agroforestería se lleva a cabo dentro del contexto de un plan de manejo de finca, donde la participación del campesino es fundamental. Al desarrollar sistemas agroforestales, los agricultores pueden lograr una producción más sostenible y diversificada, lo que les brinda ingresos más seguros y con menor riesgo. Esta integración de árboles en sistemas agrícolas también puede contribuir a la conservación de la biodiversidad y al mejoramiento del paisaje rural (Astrada 2015).

La agroforestería no solo se limita a la integración de árboles en sistemas agrícolas, sino que también puede incluir la integración de árboles en operaciones ganaderas, como en sistemas silvopastoriles. Además, se reconoce que los sistemas agroforestales pueden incluir la integración intencional de árboles distintos del cultivo principal en los sistemas agrícolas, lo que brinda beneficios adicionales (Sanial, 2020).

4.6. Importancia de los Diseños y Arreglos del Sistema MIAF

El diseño y arreglo de los sistemas agroforestales, como el MIAF, son fundamentales para maximizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Una consideración clave es la interacción entre los árboles y los cultivos, que puede influir en aspectos como la competencia por recursos y la modificación del microclima. Un diseño bien planificado debe aumentar la eficiencia del uso del agua y los nutrientes, reducir la erosión del suelo, y mejorar la productividad agrícola general. Estos principios permiten que los sistemas agroforestales, al igual que el MIAF, optimicen los beneficios ecológicos y económicos, asegurando una integración armónica entre los componentes del sistema (World Agroforestry Centre, 2013).

4.7. Antecedentes y evolución del sistema MIAF

4.7.1. Historia y evolución de MIAF

El sistema MIAF (Milpa Intercalada entre Árboles Frutales) tiene su origen en los agricultores de origen náhuatl del estado de Puebla, México. Estos agricultores

desarrollaron este sistema de cultivo como una alternativa viable para las laderas en áreas marginadas. El MIAF combina la siembra de cultivos tradicionales como maíz y frijol con árboles frutales, buscando mejorar la productividad y el ingreso de los agricultores (Cadena-Iñiguez et al. 2018).

El sistema MIAF ha demostrado ser efectivo en la generación de ingresos y en la conservación del suelo. Además, se ha observado que este sistema agroforestal puede aumentar la productividad en comparación con los cultivos simples de maíz o frijol. El MIAF se ha implementado a través de programas y proyectos que promueven la integración de árboles frutales en los sistemas agrícolas. Estos programas incluyen la formación de comunidades de aprendizaje campesino, la instalación de viveros para proveer las plantas utilizadas en el sistema, y la promoción de prácticas agroecológicas (Albino Garduño 2014).

4.8. Beneficios de la milpa

4.8.1. Diversidad de cultivo

El análisis de la diversidad de cultivos en la milpa revela la presencia de una amplia variedad de especies vegetales. En la milpa, se combinan diferentes cultivos, como maíz, frijol, calabaza, hierbas medicinales, hortalizas y árboles frutales. Esta diversidad de cultivos contribuye a la seguridad alimentaria, ya que proporciona una mayor variedad de nutrientes y alimentos disponibles para las comunidades agrícolas (Contreras s. f.).

La milpa tradicional también se caracteriza por la conservación de la biodiversidad. Los agricultores mantienen y seleccionan semillas de especies cultivadas, experimentan con nuevos cultivos y variantes, y realizan intercambios de frutos y semillas en sus comunidades y regiones. Esto promueve la adaptabilidad y la diversidad de los cultivos, así como la conservación de las especies nativas y sus parientes silvestres (Lozada y Ponce 2023).

4.8.2. Árboles Frutales en el Sistema

Aumento de la biodiversidad: La intercalación de árboles frutales en la milpa crea un entorno más diverso que puede beneficiar a la fauna, los insectos polinizadores y otros organismos. Esto contribuye a aumentar la biodiversidad en el sistema agrícola (Tabaré 2020).

Protección del suelo: Los árboles frutales ayudan a proteger el suelo contra la erosión y la pérdida de nutrientes. Sus raíces ayudan a mantener la estructura del suelo y evitan la compactación, lo que mejora la salud del suelo y su capacidad para retener agua y nutrientes (Cotler et al. 2017).

Mejora de la resiliencia: La presencia de árboles frutales en la milpa proporciona sombra y protección contra el viento, lo que ayuda a proteger los cultivos de las condiciones climáticas adversas. Esto aumenta la resiliencia del sistema agrícola y reduce el riesgo de pérdidas de cultivos debido a factores ambientales (Simonit et al. 2020).

Diversificación de ingresos: La intercalación de árboles frutales en la milpa proporciona una fuente adicional de ingresos para los agricultores. Los árboles frutales pueden producir frutas que pueden ser consumidas o vendidas, lo que diversifica los productos agrícolas y brinda oportunidades económicas adicionales (Rosset y Altieri 2018).

4.8.3. Aumento de la productividad

La intercalación de árboles frutales en la milpa puede contribuir a la regeneración del suelo, aumentar la regulación hídrica y mejorar la eficiencia en el uso de recursos, lo que se traduce en un aumento de la productividad de los cultivos. La diversificación de cultivos mediante la intercalación de árboles frutales puede proporcionar una mayor diversidad nutricional y una mayor disponibilidad de alimentos de mejor calidad (Canto et al. 2016).

4.8.4. Sostenibilidad ambiental y económica

En cuanto a la sostenibilidad ambiental, la intercalación de árboles frutales en la milpa puede contribuir a una mayor diversidad de especies y a la conservación de los recursos naturales. Además, los árboles frutales pueden ayudar a proteger el suelo contra la erosión y mejorar su calidad al proporcionar sombra y retener la humedad. También fomenta la presencia de diferentes especies de plantas y animales, lo que contribuye a la conservación de la biodiversidad. También, los árboles frutales pueden ayudar a capturar y almacenar carbono, lo que contribuye a mitigar el cambio climático (Pillado 2022).

En términos de sostenibilidad económica, la intercalación de árboles frutales en la milpa puede ofrecer beneficios como la diversificación de ingresos a través de la venta de frutas o productos derivados de los árboles. También puede ayudar a los agricultores a mitigar los riesgos asociados con la dependencia de un solo cultivo, lo que contribuye a una mayor resiliencia económica.

4.9. Ecosistema de la Milpa Intercalada con Árboles Frutales

4.9.1. Exploración de los principales cultivos de milpa y sus propiedades.

Los sistemas milpa suelen ser tachados de ineficientes porque no producen tanto maíz por unidad de tierra como lo deseado en un monocultivo de maíz. Sin embargo, la riqueza de un sistema milpa se refleja en cuatro elementos principales. En primer lugar, las semillas se han adaptado a las condiciones locales a lo largo del tiempo gracias al transcurso de las generaciones. En segundo lugar, en un sistema milpa, mientras la planta de maíz proporciona apoyo a la planta de judía para que suba, esta añade nitrógeno al suelo y eso le servirá al maíz.

En el mismo campo, la calabaza protegerá el suelo de la erosión del viento y del agua, pero también la protegerá para reducir la evaporación. En tercer lugar, el sistema milpa proporciona una fuente constante de alimento a lo largo del año que, incluso cuando el campo parece vacío, hay raíces que se pueden cosechar y comer. Se muestra que el cultivo del maíz consiste en compartir y resistir, en los campos mientras varias familias se reúnen y se ayudan mutuamente a cultivar la tierra, comparten semillas, alimentos,

conocimientos y refuerzan sus vínculos sociales (Martínez-Cruz y Camacho-villa et al, FAO 2021).

Este sistema MIAF harían más resilientes los ecosistemas a los embates del cambio climático que año tras año amenaza la producción de alimentos y la subsistencia de miles de familias, que dependen de estos rubros. El camino por recorrer es aún extenso para el ajuste de modelo de producción. Se requiere comprender en cada condición, territorio–edafológico climático, cuál es el mejor diseño, los mejores ensamblajes de biodiversidad, que genere las mejores sinergias entre los distintos componentes, los mejores rendimientos de biomasa útil para las familias campesinas y sustancialmente los servicios ecosistémicos para las poblaciones urbanas y rurales (Rojas Meza 2019).

4.9.2. Selección y características de los árboles frutales intercalados

Compatibilidad con el sistema que no compitan en exceso por recursos como luz, agua y nutrientes con los cultivos principales, también ciclo de vida y tiempo de maduración se ajusten al período de crecimiento de los cultivos principales de la milpa. Tamaño y forma de crecimiento es importante ya que asegurarse de que no afecten negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos principales, de igual manera se requiere de un suelo y clima adecuados de la región donde se establecerá la milpa. Es importante tener en cuenta que la selección de árboles frutales intercalados en una milpa puede variar según las necesidades y preferencias de los agricultores (Pillado 2022).

4.10. Interacciones Ecológicas

4.10.1. Mutualismo entre cultivos y árboles frutales.

Podemos acolchar todos los cultivos con: paja seca, hojas de árboles, viruta, hierbas, ramas, residuos del cultivo, o incluso hasta cartón, se puede acolchar con uno de estos materiales o una mezcla de todos (cualquiera de estos materiales es mucho mejor que un acolchado plástico). Estos pueden ser extraído de los frutales, pero en ecosistemas

virgen cerca de la zona se pueden recolectar microorganismos beneficio nativos, en la parte superficial del suelo o bien en hojarasca (Carrasco 2020).

También los hongos micorrizas forman inmediatamente una densa red de filamentos en el suelo que conectan las raíces de los árboles y la vida del suelo en simbiosis. Los árboles cuyas raíces prosperan en las redes de hongos micorrizas son más sanos y vigorosos, mientras que su resistencia a los patógenos o la escasez de agua en las sequías también aumenta. Suficientes nutrientes y una mejor gestión del agua también tienen un impacto positivo en el sabor de la fruta (Vávra et al. 2022).

Así como otros factores la intercalación de árboles mejora las relaciones ecológicas, permite una mejor convivencia y un mejor equilibrio en los ecosistemas, ya que sirven como refugio para muchas especies de insectos que son beneficiosos a la hora del control biológico, forman parte de huella ecológica por su fijación y adsorción de nutrientes en el suelo consiguiendo así un mejor rendimiento global en los cultivos y en los árboles frutales.

4.10.2. Competencia y facilitación en el ecosistema

De los dos preceptos anteriores, tenemos que la función de los árboles se reduce a la de secuestrar nutrientes que después serán liberados de acuerdo con la conveniencia del productor y la eventual fijación de nitrógeno (que también puede no darse), aparte, claro, de la lista de cualidades que todos conocemos (sombra, frutos, microclima, leria, etc.) pero que también está por demostrarse. Dicho de otra forma, los árboles podrían estar compitiendo con el cultivo de pasto más que complementándolo. El reto es encontrar en menor nivel de competencia a un nivel más rentable que la tecnología tradicional (Rosales Mendez 1999).

Por eso es que se toma un espacio considerado a la hora de las plantaciones para facilitar el desarrollo del cultivo, que el árbol pueda tener un espacio prolongado para tener una densidad optima, ya que, si hubiese pocos nutrientes en el suelo, los árboles absorberían todo igual en el caso del agua.

4.11. Ciclos y Flujo de Nutrientes

4.11.1. Ciclos de nutrientes en el sistema milpa-agroforestal.

En el sistema milpa-agroforestal, los ciclos de nutrientes desempeñan un papel crucial en el funcionamiento y la productividad del sistema, se caracteriza principalmente por su capacidad para mantener y ciclar los nutrientes de manera eficiente, lo que contribuye a la sostenibilidad y resiliencia del sistema, ya que reproducción del sistema milpero mantiene un arreglo circular, de tal forma de que al mismo tiempo que obtiene los productos para su subsistencia, el campesino maya recrea sus medios productivos en el mismo proceso de trabajo. En el sistema milpero las necesarias interacciones y flujos de materiales y energía entre sus componentes son la base de su sostenibilidad (Canto et al. 2016-b).

Además, el ciclo de uso de la tierra en la milpa también contribuye a la ciclación de nutrientes. El ciclo comienza con la tala selectiva de los barbechos y la siembra de los cultivos, como el maíz. A medida que los cultivos crecen, absorben nutrientes del suelo. Una vez que se cosechan los cultivos, los residuos vegetales se incorporan nuevamente al suelo, liberando nutrientes y cerrando el ciclo de nutrientes (C. Ordoñez y Hellin 2017).

4.11.2. Uso eficiente de recursos y reciclaje de nutrientes.

El sistema MIAF favorece el reciclaje de nutrientes al incorporar los residuos vegetales al suelo, lo que contribuye a mantener la fertilidad del suelo y reducir la necesidad de fertilizantes externos, la diversificación de especies provee la materia prima para el enriquecimiento del suelo, así que, a mayor diversificación, existe mayor disponibilidad de material vegetal, que eventualmente entra en proceso de descomposición a partir del aumento de microorganismos, es por eso que la presencia de materia orgánica mediante la integración de las hojas y demás material vegetal, la incorporación de estiércoles, la siembra de plantas leguminosas, entre otras prácticas, facilitan la aplicación de este principio (Rojas Meza 2019).

4.12. Variables Ecológicas Evaluadas en Sistemas Agroforestales

En los sistemas agroforestales, se evalúan diversas variables ecológicas, entre las que se incluyen la calidad del suelo, la biodiversidad, la disponibilidad de agua, y las interacciones entre especies vegetales. Estas variables son cruciales para entender cómo los diferentes componentes del sistema interactúan entre sí y con su entorno. Por ejemplo, la calidad del suelo se mide a través de parámetros como la materia orgánica, el pH y la capacidad de retención de nutrientes, los cuales son esenciales para determinar la salud del ecosistema y la productividad agrícola (Nair, 2008).

4.13. Importancia del Análisis de Variables Ecológicas

El análisis de las variables ecológicas en los sistemas agroforestales es fundamental para asegurar la sostenibilidad y resiliencia del sistema. Al evaluar estas variables, los investigadores pueden identificar las mejores prácticas de manejo que optimizan la interacción entre los componentes del sistema, como árboles, cultivos y suelo. Además, este análisis permite anticipar y mitigar posibles impactos negativos, como la degradación del suelo o la pérdida de biodiversidad, asegurando así que el sistema agroforestal pueda sostenerse a largo plazo y adaptarse a condiciones cambiantes (Nair, 2008).

4.14. Importancia del Análisis de Variables Ecológicas

El análisis de las variables ecológicas en los sistemas agroforestales es crucial para comprender y maximizar los beneficios de conservación del suelo y otros servicios ecosistémicos que estos sistemas pueden proporcionar. Evaluar variables como la estructura del suelo, la retención de agua y la biodiversidad permite identificar las prácticas que mejoran la sostenibilidad del sistema y mitigan los impactos negativos de la agricultura convencional. Este análisis es esencial para diseñar sistemas que no solo sean productivos, sino que también contribuyan a la conservación del medio ambiente, asegurando así la viabilidad a largo plazo de las tierras agrícolas (USDA Forest Service, 2000).

4.15. Gestión y Prácticas Agrícolas

4.15.1. Técnicas ancestrales de cultivo de milpa.

Los elementos básicos del sistema son: el maíz, los frijoles y el chile; métodos de cultivo únicos en su género, como la milpa (cultivo por rotación del maíz y otras plantas, con roza y quema del terreno) y la chinampa (islote artificial de cultivo en zonas lacustres); procedimientos de preparación culinaria como la ‘ (descascarillado del maíz con agua de cal para aumentar su valor nutritivo); y utensilios especiales como metates y morteros de piedra (UNESCO 2010).

Estas técnicas ancestrales de cultivo de milpa en América Latina tienen varios beneficios. Promueven la diversidad de cultivos, lo que contribuye a una dieta equilibrada y a la seguridad alimentaria. Además, son métodos sostenibles que no agotan los suelos y no requieren el uso de productos químicos (Yagel 2020).

El sistema milpa aún presenta prácticas agronómicas tradicionales como control natural de plagas, uso del abono criollo y utilización de semillas nativas, haciendo que los alimentos sean orgánicos, sanos, nutritivos, y conserven el ecosistema productivo (USAID 2017).

4.15.2. Conocimientos indígenas y su relevancia

Se propone el concepto Saberes Agrícolas Tradicionales. (“SAT”) para englobar prácticas, técnicas, conocimientos y/o cosmovisiones que responden a problemas que limitan la producción agrícola. Estos saberes, son generados en las comunidades rurales a partir de la observación curiosa, sistemática y la convivencia con la naturaleza y son transmitidos de generación a generación por la tradición oral (Antonio Gómez-Espinoza y Gómez-González 2006)

Los conocimientos locales indígenas no solo son técnicas o prácticas que se han mantenido en generación en generación también los conocimientos son culturas, es por eso que los sistemas MIAF mantienen vigente los conocimientos ancestrales en el sistema, ya que cultura tiene que ver con conservación, protección y legado que es un ejemplo claro al camino a la sostenibilidad.

Los saberes tradicionales, entendidos como los conocimientos que han sido generados, aplicados y utilizados por comunidades y pueblos tradicionales, como los grupos indígenas de América Latina, constituyen una parte medular de las culturas de dichos pueblos y tienen un enorme potencial para la comprensión y resolución de diferentes problemas sociales y ambientales (Martínez-López et al. 2019).

4.16. Tecnologías y Prácticas Modernas

4.16.1. Métodos de cultivo y manejo de árboles frutales en sistemas intercalados.

Plantación de árboles frutales: En la zona de ejecución de un proyecto de manejo sostenible, se pueden utilizar diferentes métodos de plantación de árboles frutales. Estos métodos pueden incluir la siembra de árboles en hileras o filas, dejando espacio entre ellas para otros cultivos intercalados.

Cultivos intercalados: En sistemas intercalados, se pueden sembrar otros cultivos entre las hileras de árboles frutales. Esto permite aprovechar el espacio y los recursos disponibles de manera más eficiente. Algunos ejemplos de cultivos intercalados pueden ser cultivos perennes como el café y el cacao (JICA y JAFTA 2010).

Manejo del suelo: El manejo adecuado **del suelo** es fundamental para el crecimiento saludable de los árboles frutales. Esto puede incluir prácticas como la mejora de la fertilidad del suelo, el control de malezas y la conservación de la humedad. El uso de técnicas de conservación del suelo, como la aplicación de cobertura vegetal, puede ayudar a reducir la erosión y mejorar la calidad del suelo (Dionicio et al. 2008).

El manejo de los árboles frutales en sistemas intercalados puede incluir prácticas como la poda, el riego, la fertilización y el control de plagas y enfermedades. Estas prácticas ayudan a asegurar un crecimiento saludable de los árboles y una buena producción de frutas (Ramírez Valverde et al. 2023).

4.16.2. Herramientas y tecnologías agrícolas actuales.

En la actualidad nos enfrentamos a una visión integral sobre las últimas innovaciones en el sector agrícola, se resalta la importancia de la tecnología y la investigación en la mejora de la productividad y la sostenibilidad en la agricultura, se han explorado diversas áreas de innovación, como la agricultura de precisión, el uso de drones y sensores, la biotecnología y la gestión eficiente de los recursos naturales, además, la implementación de programas y políticas gubernamentales que fomentan la innovación en la agricultura (Sergieieva 2016).

4.17. Impacto Socioeconómico y Ambiental

4.17.1. Efectos del sistema en la conservación de suelos, agua y biodiversidad.

El sistema MIAF tiene un impacto positivo en la conservación de suelos, agua y biodiversidad, el sistema MIAF combina diversos cultivos con árboles frutales, lo que ayuda a reducir la erosión del suelo al proporcionar una cobertura vegetal más densa, además, al intercalar árboles frutales, se promueve la diversidad de especies y se crea un hábitat propicio para la fauna silvestre (Garduño et al. 2021).

En cuanto al agua, el sistema MIAF contribuye a la conservación al mejorar la infiltración y retención de agua en el suelo, reduciendo así la escorrentía y la pérdida de nutrientes, estos efectos positivos en la conservación de suelos y biodiversidad hacen del sistema sea una opción prometedora para una agricultura más sostenible y resiliente (Turrent Fernández et al. 2017).

4.17.2. Seguridad Alimentaria y Desarrollo Comunitario

4.17.3. Rol del sistema en la seguridad alimentaria de comunidades locales.

El sistema contribuirá a generación de empleos, autosuficiencia alimentaria, mejoría de ingresos, cobertura forestal y a cubrir las necesidades alimenticias básicas, otro beneficio del sistema MIAF es su capacidad para mejorar la resiliencia de las comunidades locales frente a los desafíos climáticos y ambientales. Al tener una mayor diversidad de cultivos y árboles, las comunidades pueden hacer frente a las condiciones climáticas y reducir su dependencia de un solo cultivo. Esto ayuda a mitigar los riesgos de la inseguridad alimentaria en caso de sequías, inundaciones u otros eventos climáticos extremos (Raúl et al. 2021).

4.17.4. Valor nutricional de los productos obtenidos.

De estos cultivos se derivan diferentes platillos típicos nutricionales ya que los cultivos del sistema milpa aporta con sus productos alimenticios a la seguridad alimentaria de la población ubicada en las comunidades rurales, el maíz nos aporta carbohidratos, el frijol proteína, y el ayote ofrece las vitaminas y minerales. Se pueden encontrar otros cultivos en el sistema milpa como hierba mora, hortalizas, frutales; entre otras, que, en la mayoría, continúan aportando proteínas, vitaminas y minerales al organismo. Cada uno de estos cultivos puede proporcionar nutrientes para una dieta balanceada ofreciendo una excelente formación de los huesos, cuerpo y la sangre (USAID 2017).

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. Descripción del área de estudio

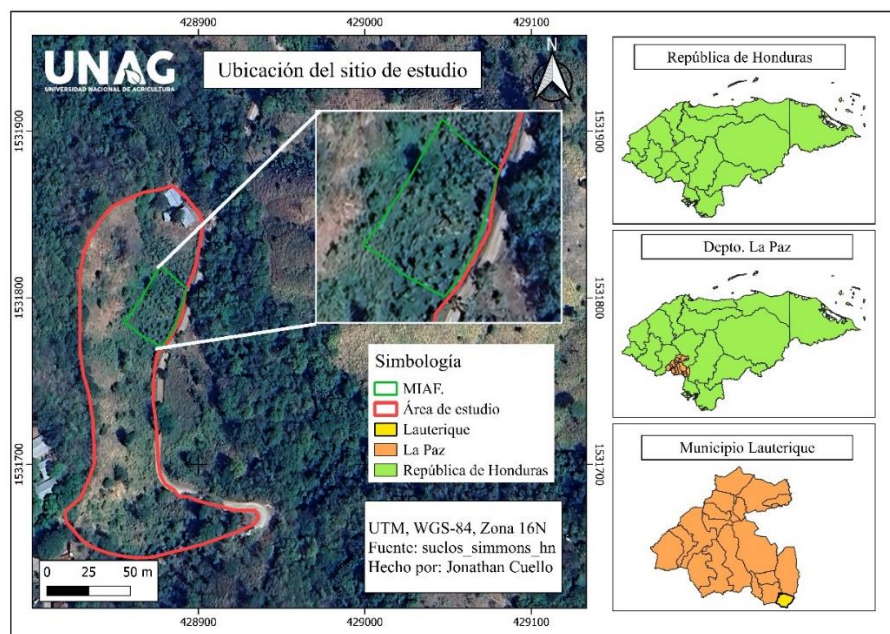


Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Lauterique.

El municipio de Lauterique se encuentra en el sur del departamento de La Paz, Honduras, y tiene una extensión territorial de aproximadamente 36 kilómetros cuadrados. Lauterique es conocido por su clima cálido, con temperaturas que oscilan entre los 27°C y 36°C a lo largo del año, reflejando las características climáticas típicas de la región sur del país. El municipio cuenta con una población total de 2,824 habitantes, distribuidos en 4 aldeas y 27 caseríos.

En cuanto a la infraestructura básica, el municipio está interconectado por un vial rojo de aproximadamente 20.3 kilómetros, de los cuales una pequeña parte está enchapada con piedra en el casco urbano. La densidad poblacional es de 76.17 habitantes por kilómetro cuadrado, lo que evidencia una población dispersa principalmente en áreas rurales, siendo las comunidades más pobladas El Amate, Ojo de Agua y Las Minillas.

Lauterique presenta una estructura socioeconómica centrada en la agricultura de subsistencia, con cultivos predominantes como maíz, frijol y café. La población mantiene un fuerte sentido de comunidad, caracterizado por la colaboración y el respeto mutuo, lo cual se refleja en sus actividades sociales y religiosas (municipalidad de Lauterique, 2013)

5.2. Materiales y equipo

Piocha, machete, dúplex, barra, semillas, materia orgánica, nivel de manguera, cuerda, navaja, frasco de vidrio hermética, palín, pala, baldes, pailas, mangueras, botes plásticos, bolsa hermética, cartulina, marcadores, bomba de riego, computadora lápiz y libreta, utensilios de laboratorio, GPS (Anexo 1), refractómetro.

5.3. Enfoque metodológico

El presente estudio se basa en la investigación-acción participativa (IAP), una metodología que integra a los agricultores y otros actores locales como coinvestigadores activos en el proceso de investigación. Este enfoque no solo busca generar conocimiento científico, sino también fortalecer la capacidad de las comunidades locales para tomar decisiones informadas que promuevan la sostenibilidad agrícola. A través de la IAP, los participantes colaboran en todas las etapas del estudio, desde la identificación de problemas hasta la implementación y evaluación de soluciones. Este proceso participativo es esencial para asegurar que los resultados de la investigación sean directamente aplicables en los contextos locales, promoviendo prácticas agrícolas que sean tanto ecológicamente sostenibles como socialmente equitativas (ESA Journals, 2023).

5.4. Fase 1 Creación del diseño e implementación del mismo.

5.4.1. Observación continua

La observación continúa realizada en la zona de estudio se basa en principios de la investigación cualitativa, donde la observación no participativa es un método clave para recolectar datos en su contexto natural sin intervención directa del investigador. Según Angrosino (2007), la observación exhaustiva permite al investigador captar la complejidad del entorno social y natural, documentando fenómenos tal como se presentan en el (Anexo 2) lo que es esencial para comprender las dinámicas locales y las características intrínsecas del área de estudio. Los criterios empleados para esta observación incluyen la sistematicidad en la recolección de datos, la flexibilidad para ajustar el enfoque en función de los fenómenos observados y la precisión en el registro de los eventos tal como ocurren. Estas notas de campo, cuidadosamente documentadas, se utilizaron para realizar un análisis posterior que proporcionó una visión clara y detallada del entorno, lo cual fue crucial para planificar y fortalecer las actividades integrales en el marco del estudio (Angrosino, 2007).

5.4.2. Dialogo semiestructurado

Se llevó a cabo un acercamiento al municipio de Lauterique, donde se realizaron interacciones directas con los agricultores locales, quienes fueron las principales fuentes de información para esta investigación. El proceso se centró en establecer un diálogo semiestructurado con los agricultores de las comunidades del Moray y la trinidad, caserillo de la aldea del Ojo de Agua. Estas conversaciones fueron fundamentales para recopilar la información necesaria para el diseño del sistema agroforestal MIAF en la región.

Durante estas interacciones, se obtuvo información general sobre los sistemas productivos, los componentes más dominantes y la identificación de especies alimenticias. Es importante destacar que la relación con los agricultores es crucial, no solo porque son clave para llevar a cabo proyectos, sino también porque poseen un conocimiento profundo de su localidad. Según Ericka Bonilla (2008), las comunidades rurales juegan un papel importante en el desarrollo de un país debido a los recursos que poseen. Asimismo, la relación con estas comunidades es esencial, ya que la falta de esta puede frenar el desarrollo comunitario. Para mitigar este riesgo, es necesario incluir la asistencia técnica y el manejo adecuado de los recursos.

Dentro del municipio, se visitaron dos comunidades cercanas a la zona mostrada en la (Figura 2) para brindar asistencia técnica a los agricultores y, al mismo tiempo, integrar conocimientos que permitieran identificar las especies más adaptables a la región, aquellas de mayor demanda cultural y las que mejor podrían asociarse en el sistema. Por ejemplo, algunos agricultores ya asociaban los frutales con valeriana para ayudar a prevenir la erosión del suelo, especialmente en las laderas pronunciadas que, durante las épocas lluviosas, son propensas a sufrir erosiones.

En las comunidades visitadas, se observó que la mayoría de las personas cultivaban siguiendo principios similares a los de la sintropía, aunque sin el conocimiento necesario para optimizar su implementación y maximizar los beneficios. Según Roger Gietzen (2016), la sintropía se basa en esquemas intercalados, biodiversos y adaptables, que emulan un bosque secuencial para la regeneración de los cultivos. Este principio, combinado con el sistema MIAF, podría ser una alternativa viable para mejorar la seguridad alimentaria en la región.

El diálogo semiestructurado, utilizado como metodología principal, se basó en la socialización con los agricultores. En lugar de formular preguntas directas, se abordaron de 8 a 10 temas estructurados de interés principal, apoyados en una guía de entrevista (Anexo 3). Esto permitió explorar en profundidad temas como las necesidades de la comunidad, las limitaciones que enfrentan, sus costumbres alimenticias y de producción, y las expectativas sobre la integración de nuevas prácticas en el sistema agroforestal.

Durante el diálogo, se discutieron temas esenciales para determinar la distribución espacial de los cultivos en función del espacio disponible, la selección de especies de árboles frutales a utilizar, los ciclos de siembra y cosecha, y otros aspectos relevantes. Se puso especial atención en la interacción entre los cultivos y los árboles frutales, así como en los beneficios mutuos que podrían obtenerse de esta combinación.

El diálogo semiestructurado se caracterizó por ser un intercambio fluido y natural, en el cual se utilizó un recordatorio de los temas a tratar para mantener la estructura sin perder

la espontaneidad. Esto permitió integrar los conocimientos y experiencias de los agricultores con los objetivos técnicos del estudio, logrando un entendimiento más claro de lo que se pretendía alcanzar en el diseño del sistema MIAF.

Finalmente, el proceso de recopilación de información mediante este método no solo permitió obtener datos valiosos sobre las prácticas y necesidades locales, sino que también fortaleció el vínculo con las comunidades. Esto aseguró que el diseño final del sistema agroforestal fuese adecuado a las realidades y expectativas de las mismas.

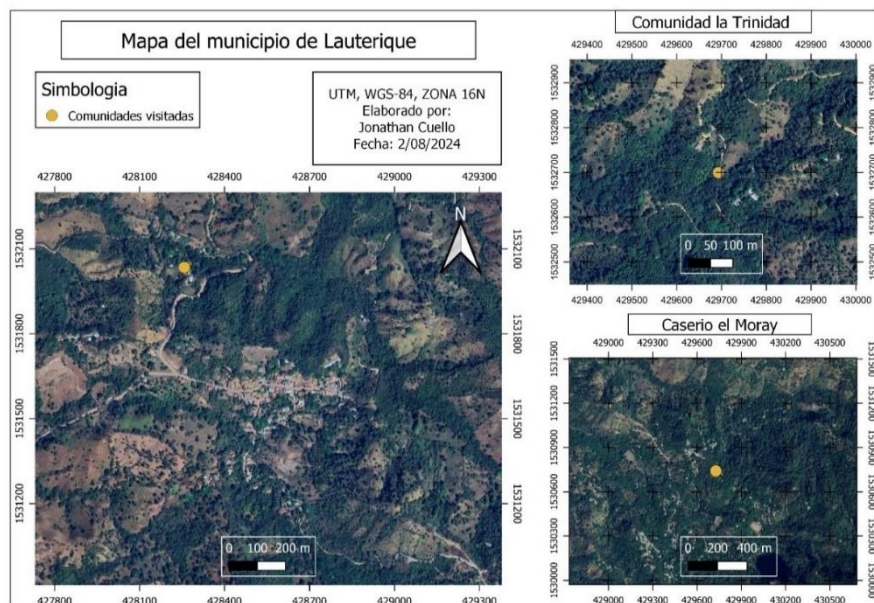


Figura 2. Mapa de las zonas visitadas en el municipio de Lauterique.

5.4.3. Delimitación del terreno.

En el área de estudio, se procedió a estacar toda la superficie para obtener una georreferenciación precisa de los puntos seleccionados. Para este proceso, se utilizó el programa Fields Area Measure, como se muestra en la (figura 3). Con esta herramienta, se delimitó el terreno, obteniendo tanto el perímetro como el área de la parcela. Posteriormente, estos puntos fueron transferidos a QGIS con el objetivo de elaborar un croquis detallado de la parcela y sus componentes.

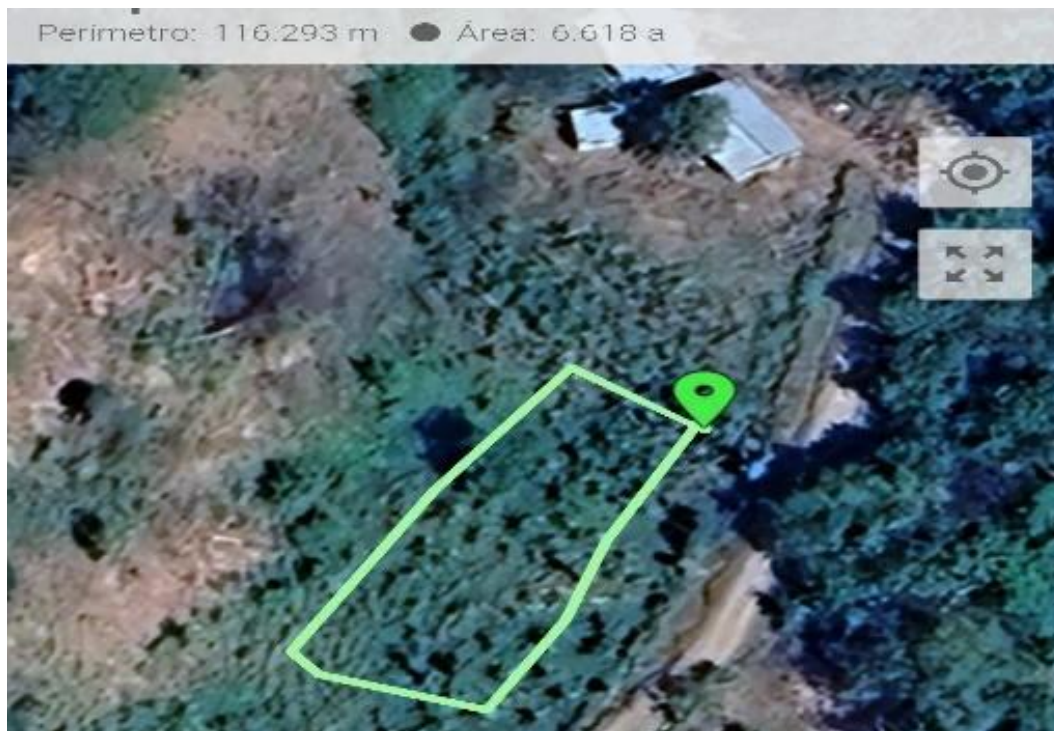


Figura 3. Delimitación del área para la implementación de sistema MIAF.

5.4.4. limpieza del terreno

La unidad experimental se encontraba inicialmente cubierta por una *Musa paradisiaca*, establecida hace tres años, junto con un cultivo de *Manihot esculenta* Crantz. Para adecuar el terreno al nuevo sistema agroforestal, se procedió a la eliminación de todas las plantas no productivas, conservando únicamente aquellas que estaban en plena producción.

El proceso de limpieza del área se llevó a cabo durante un período de tres días. En primer lugar, se utilizó una barra para extraer completamente las plantas de la *Musa paradisiaca*, incluyendo sus raíces y brotes, con el objetivo de evitar el rebrote. De manera similar, se procedió con la eliminación de la *Manihot esculenta* Crantz. Posteriormente, se chapearon los matorrales más altos, facilitando así la limpieza con el azadón, que se realizó de manera exhaustiva en todo el terreno.

Durante la limpieza, se recogieron todos los desechos presentes, incluidos plásticos y otros materiales no biodegradables. Este trabajo permitió dejar el terreno libre de vegetación no deseada y preparado para la implementación del nuevo sistema.

Para ilustrar el proceso, la (figura 4) muestran el estado del terreno antes y después de la limpieza, respectivamente. Se observa la densa cobertura vegetal inicial y se aprecia el terreno despejado y listo para la siguiente fase del proyecto.



Figura 4. Limpieza del área para la implementación de sistema MIAF.

5.4.5. Líneas claves

Tabla 1. Paso y procedimientos de la implementación de las líneas claves

Paso	Procedimiento
1. Determinación del Punto de Referencia	Utilizando un nivel de manguera, se identificó la zona más baja del terreno como punto de referencia, debido a un cambio pronunciado en la pendiente. Este punto es crucial para la

	implementación de las líneas claves (Keylines). También se determinó el porcentaje de la pendiente.
2. Trazado de la Primera Línea Clave	Basado en la técnica de Keyline, se trazó la primera curva a nivel en la separación más amplia entre las pendientes. Esta curva serviría para la elaboración de las zanjas necesarias para la filtración del agua y prevención de la erosión.
3. Excavación de las Zanjas	Se excavaron zanjas a lo largo de la primera línea clave con una profundidad de 20 cm y forma de media luna, orientadas en contra de la pendiente. Estas zanjas facilitan la retención de agua y reducen la velocidad del flujo, previniendo la erosión.
4. Establecimiento de Módulos en el Terreno	Se trazaron un total de cuatro líneas claves, espaciadas a 10 metros. Cada línea clave define un módulo compuesto por: - Dos hileras de árboles frutales: La primera hilera se plantó detrás de la zanja, y la segunda a 5 metros de la zanja. - Callejones: Espacio de 5 metros entre hileras donde se prepararon tres camas de cultivo paralelas a la línea clave. - Configuración del Módulo: Cada módulo incluye seis camas de cultivo, distribuidas de la siguiente manera: - Tres camas arriba de la primera hilera de árboles frutales. - Tres camas entre las dos hileras de árboles frutales.
5. Repetición del proceso	El proceso de trazar líneas claves, excavar zanjas y establecer módulos se repitió hasta completar las cuatro líneas claves, maximizando la conservación de agua y minimizando la erosión en el terreno. (Anexo 4).

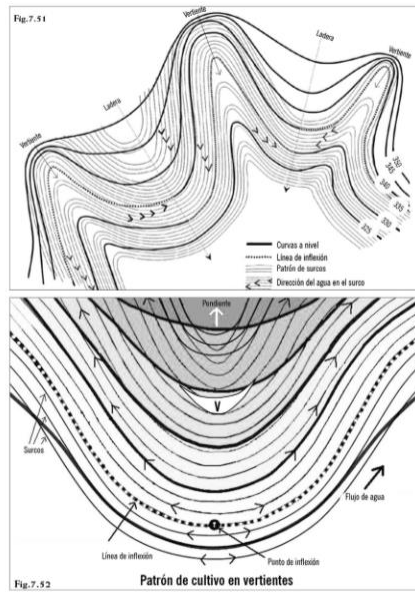


Figura 5. Imagen de las líneas claves en el la pendiente (Grass, 2012)



Figura 6. Establecimiento de las líneas claves para la elaboración de las zanjas.

5.4.6. Cálculo del Potencial de Esguerrimiento de la Parcela

El escurrimiento del área fue necesario determinarlo para saber cuánta agua se escurre en el área en su movimiento natural ya que esto sería antes de keyline que pues al final nos ayudara a retener más el agua y que el movimiento del agua tenga otro curso para su eficiencia en el sistema.

La fórmula utilizada para calcular el volumen de escurrimiento (V_m) es la siguiente:

$$V_m = C_e \times P_m \times A$$

Donde:

- C_e es el coeficiente de escurrimiento
- P_m es la precipitación anual en mm
- A es el área de la parcela en m^2

Para el coeficiente de escurrimiento se necesita tomar varios parámetros como usos de suelo, la pendiente y textura del suelo, para esto pues se termina con una tabla que nos proporciona SICCE (2023)

Tabla 2. parámetros para el cálculo del Potencial de Escurrimiento de la Parcela

suelo	Pendiente del terreno	Textura del suelo	Textura del suelo	Textura del suelo
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
	Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
	Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales	Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
	Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
	Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Cultivo	Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
	Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
	Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

5.4.7. Capacidad de recolección de agua de los canales o líneas claves

Para determinar la capacidad de agua que captan los canales, se estableció anteriormente curvas a nivel con el nivel de maguera y con el programa Qgis se identificaron también la curvas a nivel para luego analizar el flujo natural del agua (vertientes y laderas) y las pendientes del terreno mediante observación directa en el lugar. Con esta información, se identificó el trayecto del agua y se determinó el objetivo del diseño del terreno, enfocado en un sistema que filtre y distribuya mejor el agua no solo que llega directamente si no también aquella que viene de la escorrentía. Posteriormente, se realizó el diseño hidrológico alineado con la línea clave del terreno.

5.4.8. Diseño del sistema

Para el diseño del sistema agroforestal MIAF en Lauterique, se utilizó una metodología basada en las propuestas de Cortes y Turrent. Esta metodología plantea la siembra de cultivos anuales, como maíz y frijol (Anexo 5) en medio de dos hileras de árboles frutales, lo que permite una interacción óptima entre los componentes del sistema. El diseño se fundamentó en el principio de sintropía, integrando una agricultura sintrópica para aumentar la dinámica y la sostenibilidad del sistema.

El proceso de diseño comenzó con un análisis detallado del terreno, utilizando mapas para identificar el movimiento natural del agua, pendiente y las curvas de nivel. Este análisis fue crucial para comprender cómo el agua se desplazaba por la parcela y para planificar la ubicación de zanjas y líneas clave que optimizaran la infiltración y redujeran la erosión. Los mapas de curvas de nivel también permitieron identificar las áreas con mayor riesgo de escorrentía, donde fue necesario implementar estrategias específicas para conservar el suelo y el agua.

Una vez analizado el movimiento del agua, se procedió a rediseñar el flujo hídrico mediante la creación de zanjas siguiendo las curvas de nivel identificadas en los mapas. Estas zanjas fueron fundamentales para modificar el movimiento del agua, asegurando que se distribuyera de manera uniforme a lo largo de la parcela, maximizando la absorción de agua en el suelo y minimizando la erosión.

Posteriormente, se planificó la ubicación de los elementos vegetales. Para esto, se establecieron hileras de limones a una distancia de 5x5 metros, colocadas estratégicamente detrás de las líneas clave. Entre las hileras de *citrus limon*, se plantó *Citrullus lanatus* a una distancia de 60 cm de los árboles, mientras que en el espacio intermedio de 2.5 metros entre los limones se integró la *Musa paradisiaca*. La milpa, compuesta por maíz, frijol se distribuyó en tres camas que se ubicaron en los espacios entre las hileras de árboles frutales (Figura 7)

Este diseño permitió una integración armónica de los cultivos anuales con los frutales, favoreciendo la sinergia entre los diferentes componentes del sistema. Además, la metodología utilizada aseguró que el sistema fuera resiliente y sostenible, aprovechando al máximo los recursos naturales disponibles en el terreno.

Finalmente, el diseño se ilustró en varios mapas, los cuales muestran tanto el movimiento del agua como la disposición de los elementos vegetales en el sistema. Estos mapas fueron esenciales para la planificación y ejecución del diseño, permitiendo visualizar de manera clara y precisa cómo se interrelacionan los diferentes componentes del sistema agroforestal MIAF. La disposición final de los cultivos y frutales, basada en la sintrópica y en los principios de conservación del suelo y agua.

5.4.9. Diseño y arreglo de parcela de complejidad

Arreglo de componentes en parcela de complejidad - Finca Osman Rivera

Tabla 3. Arreglo de parcela de complejidad.

*	//	*	/	*	//	*
Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon
*	//	*	/	*	//	*

Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon
//	*	/	*	//	*	/
Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon	Cultivo en callejon
//	*	/	*	//	*	/

Simbología

// 5 x 5 Limón

* 60 cm Sandilla

/ 2.5 Plátano

C.C 25cm x 80 cm Maíz y Frijol

Nota

Frutales: Limón, sandilla y plátano

Gramíneas: Frijol y maíz

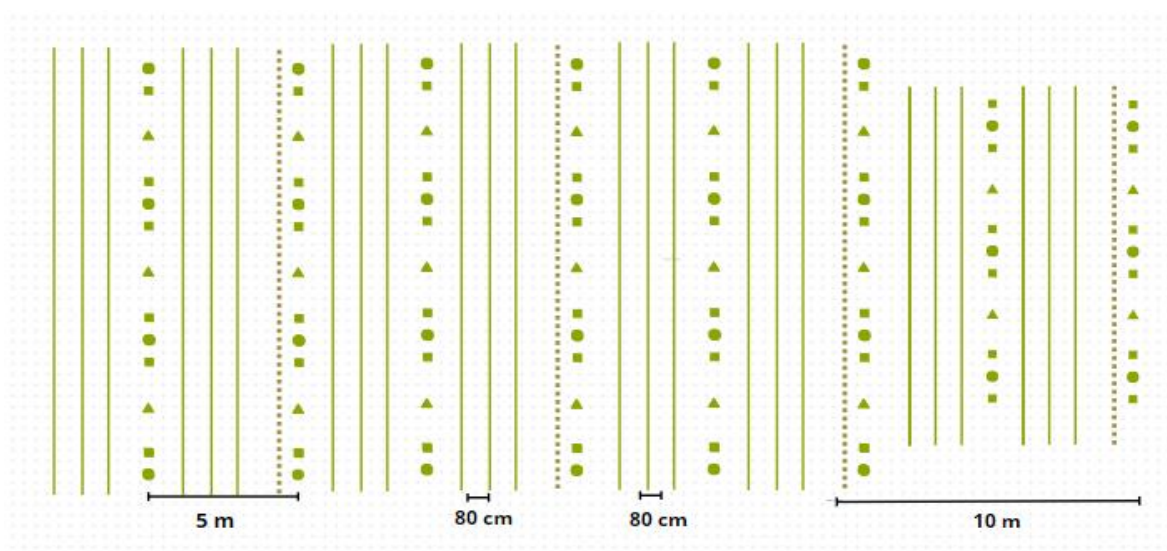
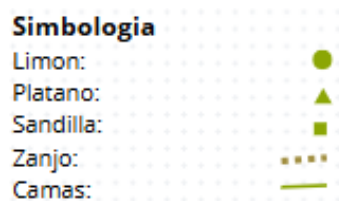


Figura 7. Propuesta de diseño del MIAF



5.4.10. Hoyado

Después de completar el diseño del terreno, se procedió a la elaboración de los agujeros para la plantación de plántulas frutales. Para optimizar el crecimiento y la salud de los árboles, se realizaron agujeros de 60 cm x 60 cm y una profundidad de 60 cm (figura 8) conocidos como "super guacas". Estos agujeros permiten un mejor desarrollo radicular, lo que se traduce en un mejor rendimiento de las plantaciones.

Para realizar las "super guacas", se utilizó una piocha para profundizar el agujero y una barra para darle forma precisa. Se fabricó la elaboración de 30 hoyos para las plántulas de frutales.

Además, para la siembra de la sandilla, se realizaron huacas redondas de 20 cm de diámetro y una profundidad de una cuarta (aproximadamente 20 cm), con un total de 48 huacas. Estas huacas fueron diseñadas para facilitar el crecimiento adecuado de la sandilla en el espacio disponible y mejorar su humedad (Anexo 6).

Finalmente, se prepararon 22 hoyos para la huerta, con una profundidad de aproximadamente dos cuartas (unos 40 cm). Estos hoyos fueron distribuidos de manera estratégica en el terreno para maximizar el uso del espacio y asegurar un buen crecimiento de los cultivos, en la (figura 1) muestra uno de los agujeros elaborados durante este proceso, ilustrando la profundidad y precisión con la que se realizaron las "super guacas" para la plantación de los frutales.



Figura 8. Elaboración de hoyos para la plantación de los frutales.

5.4.11. Siembra y Trasplante

Municipio de Lauterique enfrenta importantes desafíos relacionados con la disponibilidad de agua, especialmente durante la temporada de verano. Según datos históricos, la precipitación en esta región disminuye drásticamente en los meses de marzo a mayo, con un promedio de menos de 50 mm de lluvia mensual durante este período (FAO, 2019). Esta situación obliga a implementar estrategias cuidadosas de manejo del agua para minimizar la pérdida y asegurar el éxito en la siembra y trasplante de cultivos. Como parte de la estrategia para mitigar estos efectos, se decidió plantar solo una parte de los cultivos, priorizando aquellos más adaptados y esenciales.

Debido a estas condiciones adversas, el proceso de siembra y trasplante se llevó a cabo de manera más lenta y controlada para prevenir la pérdida de plantas decidiendo así plantar la *Citrus limon* y *Citrullus lanatus* por sus condiciones, pero de igual manera en pequeñas densidades, dejando los cultivos como el maíz y frijol para después, cuando se presentaran mejores condiciones de riego. Se plantó en dos partes, plantando en la primera catorce árboles frutales y veinticuatro plantas de sandía (*Citrullus lanatus*). Para optimizar la retención de humedad en el suelo y asegurar un buen establecimiento de las plantas, se siguieron los siguientes pasos:

Procedimiento para el *Citrus limón*: se cavaron hoyos para los árboles frutales, y en cada uno se añadió una capa de la tierra superficial más viva, correspondiente a los primeros veinte centímetros del suelo, rica en materia orgánica y microorganismos beneficiosos. Luego, se agregó una palada de aserrín para mejorar la estructura del suelo y facilitar la retención de agua. Se cubrió con más tierra y se añadió una capa de tres paladas de bocashi, un abono orgánico fermentado que enriquece el suelo con nutrientes.

Finalmente, el hoyo se cubrió con la tierra restante, asegurando que el árbol quedara en una posición donde el agua pudiera empozarse adecuadamente. Alrededor del árbol, se colocó brosa de frijol como materia seca, cubierta con una capa de aserrín, lo que ayudó a mantener la humedad y proporcionó nutrientes adicionales a las plantas (Anexo 7).

Procedimiento para las *Citrullus lanatus*: las huacas se regaron durante tres días consecutivos antes de la siembra para asegurar que el agua penetrara profundamente en el suelo, creando un ambiente húmedo que facilitara la expansión de las raíces. Después de este riego inicial, se añadió bocashi en la mañana del día de la siembra para enriquecer el suelo.

Finalmente, en la tarde del mismo día, se procedió a sembrar las sandías, asegurando que las plantas tuvieran acceso inmediato a los nutrientes y la humedad necesaria para su desarrollo. De la misma manera, se agregó materia seca alrededor de las sandías, siguiendo el mismo enfoque utilizado con los árboles frutales, para mejorar la retención de humedad y proporcionar nutrientes a las plantas (Anexo 8).

Esta estrategia no solo permitió un uso más eficiente del agua disponible, sino que también garantizó que las plantas tuvieran un entorno favorable para su crecimiento, incluso en condiciones de sequía. El manejo cuidadoso del suelo y la incorporación de materia orgánica como el bocashi y el aserrín mejoraron la capacidad del suelo para retener agua, lo que es crucial en una región donde los recursos hídricos son limitados.



Figura 9. Trasplantes de los frutales ya establecidos.

5.4.12. Manejo agroecológico

Tabla 4. Elaboracion de insumos organicos.

OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN	INFRAESTRUCTURA / EQUIPO UTILIZADO
Elaboración de Bioles Caseros	Para la elaboración de bioles caseros, se comenzó preparando los ingredientes esenciales, que incluyen estiércol de animales (vacuno o equino), agua, ceniza, leche o suero, y melaza o azúcares naturales. En un recipiente grande, se mezclaron 2 partes de estiércol con 1 parte de agua, asegurando que el estiércol se disolviera por completo. A esta mezcla se le agregó 2 litros de melaza, lo cual aporta nutrientes adicionales a los microorganismos, junto con 2 litros de leche y 5 libras de ceniza, todo para 20 litros de agua. El recipiente se cubrió con una tela o tapa que permitiera la entrada de aire, necesaria para la fermentación aeróbica, pero evitando la entrada de contaminantes. La mezcla se dejó fermentar en un lugar oscuro y fresco durante aproximadamente 2 a 3 semanas.	Recipiente grande, tela o tapa, bomba de 20 litros, melaza, leche, ceniza, suero o leche, estiércol.

Durante este tiempo, la mezcla se removió ocasionalmente para asegurar una buena aireación y evitar la formación de malos olores. Tras el período de fermentación, el biol fue colado para separar los sólidos, obteniendo así el líquido fermentado. Para la aplicación del biol, se utilizó una bomba de 20 litros, en la que se mezclaron 2 litros de biol por 18 litros de agua. Esta mezcla se aplicó directamente a las hojas y al suelo, asegurando que las plantas reciban los nutrientes necesarios de manera eficiente.

Elaboración de Té de Neem	La elaboración del té de neem como repelente natural comenzó con la recolección de hojas frescas de neem (<i>Azadirachta indica</i>). Las hojas fueron cuidadosamente lavadas para eliminar cualquier suciedad o contaminante y luego se maceraron para facilitar la extracción de sus compuestos activos. En una olla grande, se hirvió agua, y una vez alcanzado el punto de ebullición, se añadieron las hojas de neem maceradas. La mezcla se dejó hervir a fuego lento durante aproximadamente 30 minutos para asegurar la extracción completa de los principios activos de las hojas. Después de la ebullición, la olla se retiró del fuego y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Una vez fría, la mezcla fue colada para eliminar las hojas y otros residuos sólidos, quedando solo el extracto líquido. El té de neem se almacenó en recipientes oscuros y limpios para protegerlo de la luz y conservar sus propiedades repelentes. Para su aplicación, se utilizó una dilución 50/50, mezclando partes iguales de té de neem y agua, antes de aplicarlo	Olla grande, recipiente oscuro para almacenamiento, colador, agua, hojas frescas de neem.
----------------------------------	---	---

	sobre las plantas como un efectivo repelente de plagas.	
Control de Malezas	El control de malezas se realizó de forma manual, empleando herramientas manuales como machetes y azadones. Se identificaron y eliminaron aquellas hierbas y plantas que competían por recursos con los cultivos establecidos. El primer control se realizó 10 días después de la siembra, para asegurar que las malezas no interfirieran en el crecimiento inicial de los cultivos. Posteriormente, se llevaron a cabo controles adicionales según la necesidad, generalmente cuando la altura de las malezas comenzaba a ser significativa y amenazaba con competir por luz, agua y nutrientes con los principales cultivos. Este enfoque manual permitió un control preciso y dirigido de las malezas, minimizando el daño a los cultivos y asegurando que el sistema de cultivo mantuviera su productividad.	Herramientas manuales (machete, azadón), guantes de protección.



Figura 10. Elaboración de insumos orgánicos.

5.5. Fase 2 Comparación de variables agroecológicas

5.5.1. Cobertura del suelo

Tabla 5. Paso para los nuestros de cobertura del suelo.

Pasos	Descripción del proceso
1. Elaboración de la Herramienta de Muestreo	Se construyó una herramienta de muestreo utilizando tubos de PVC. Para ello, se cortaron 4 partes iguales de un metro de longitud cada una. Estas piezas se unieron mediante codos de PVC y se pegaron con pegamento especial para tubos, formando un cuadrado con un área de un metro cuadrado.
2. Creación de la Cuadrícula	Sobre el marco de PVC, se ataron veinte tiras de cuerda, cortadas a la medida adecuada, a una distancia de diez centímetros entre cada una, tanto en sentido horizontal como vertical, formando así una cuadrícula con 100 cuadros iguales. Cada cuadro de la cuadrícula representaba un 1% del área total de un metro cuadrado.
3. Selección de muestras	Se seleccionaron 4 muestras de forma aleatoria a lo largo de un recorrido de cien metros en el área de estudio. En cada punto de muestreo, se colocó la cuadrícula de PVC en el suelo para evaluar la cobertura vegetal.
4. Identificación y Registro de Especies	Dentro de cada cuadrícula, se identificarán y registrarán las especies presentes. Para cada especie identificada, se contó el número de cuadros de la cuadrícula en los que estaba presente, lo que permitió calcular su índice de cobertura en relación con el área total.
5. Cálculo del Índice de Cobertura	El índice de cobertura para cada especie se calculó sumando la cantidad de cuadros en los que se encontraba la especie, determinando así su porcentaje de cobertura dentro de la muestra tomada. Este dato fue luego utilizado para establecer los promedios de cobertura en las diferentes áreas muestreadas.

Tabla 6. Tabla de especies para el muestreo de cobertura.

Especies	Muestreo de cobertura					Promedio
	1	2	3	4	5	

5.6 Fase 3 Evolución de la salud de las plantas según fase fenológicas

5.6.1. Medir los niveles de grados brix

La presente metodología tiene como objetivo determinar la concentración de sólidos solubles (grados Brix) en la savia de hojas de limones (*Citrus limón*) mediante el uso de un refractómetro (Anexo 8). Este análisis es fundamental para evaluar la salud nutricional de las plantas y la eficiencia de los tratamientos aplicados, tales como los biofertilizantes.

En primer lugar, se seleccionaron cuatro muestreos por cada módulo de plantación dentro del área de estudio. Dentro de cada módulo, se establecieron puntos de muestreo aleatorios, los cuales fueron marcados con estacas para futuras referencias. En cada módulo se seleccionó un punto de muestreo, resultando en un total de cuatro puntos de muestreo. A su vez, en cada punto seleccionado, se eligieron al azar cuatro plantas de limón, garantizando así la representatividad de la muestra dentro del módulo.

Para la preparación de las muestras, se procedió a cortar las hojas más tiernas de cada planta seleccionada, ya que estas hojas son más indicativas del estado nutricional actual de la planta. Posteriormente, las hojas fueron machacadas con cuidado para liberar la savia, la cual se extrajo utilizando un gotero específico para refractómetros, asegurando de esta manera que la muestra no se contaminara.

La medición de los grados Brix se llevó a cabo utilizando un refractómetro. Se colocó una gota de savia en el prisma del dispositivo, que mide la cantidad de sólidos disueltos, expresada en grados Brix. Este valor indica la concentración de azúcares, principalmente

sacarosa, en la savia. Cada lectura se tomó inmediatamente después de la extracción de la savia para garantizar la precisión de los resultados, teniendo en cuenta que un grado Brix equivale a 1 gramo de sacarosa en 100 gramos de solución.

El muestreo se realizó de manera semanal en cada uno de los cuatro módulos. Todo el proceso de recolección de muestras, extracción de savia y medición de grados Brix se completó en un solo día para cada módulo. Este cronograma de muestreo semanal permitió capturar las variaciones en la concentración de Brix a lo largo del ciclo fenológico del limón, reflejando las condiciones nutricionales de la planta en diferentes etapas de crecimiento.

Los datos obtenidos en cada uno de los cuatro módulos fueron analizados para identificar patrones de variación en la concentración de sólidos solubles. Los resultados se compararon entre los diferentes muestreos semanales para evaluar el efecto de los tratamientos aplicados. Además, los resultados fueron documentados en detalle y correlacionados con las fases fenológicas del limón, lo que proporcionó una interpretación más completa del estado nutricional y el potencial productivo de las plantas. Se realizó especial cuidado en llevar a cabo las mediciones en condiciones ambientales estables, para evitar que factores externos como la temperatura y la luz directa influyeran en las lecturas del refractómetro.

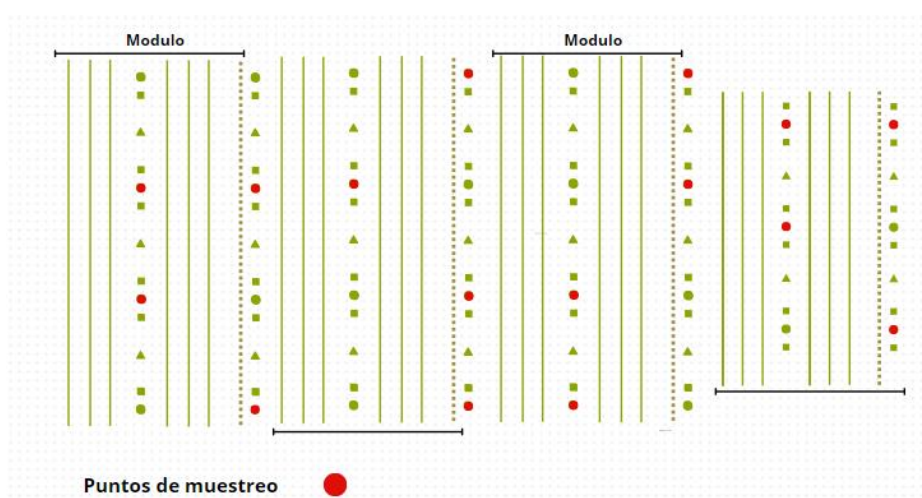


Figura 11. Esquema de muestro para la extracción de savia.

5.7. Fase 4 variables físicas, químicas y biológicas del suelo

5.7.1. Muestreo de Suelo

Para evaluar estas propiedades del suelo en el sistema de milpa intercalado con árboles frutales en comparación con un bosque o un área natural no intervenida, se evaluaron diferentes análisis y mediciones a través de la obtención de muestras del suelo. En este caso, se realizó un muestreo en zig-zag, donde con la ayuda del palín y un balde se recolectaron alrededor de ocho submuestras por cada una de las unidades a analizar en un recorrido de 15 metros.

De forma representativa y precisa, con profundidades de 15 a 20 cm. Se recolectó una muestra compuesta por sitio, la cual se depositó en un balde para obtener una muestra más homogénea y descartar la cantidad de tierra que no se iba a utilizar. Para el embolsado hermético se requirió una cantidad de 1000 gramos, que se etiquetó y se llevó al laboratorio para su análisis.

5.7.2. Análisis de suelo fisco

Determinación de textura: La metodología para determinar la textura del suelo se fundamenta en la dispersión química empleando hexametafosfato de sodio y en la dispersión física mediante el uso de batidoras eléctricas. El porcentaje de arena, limo y arcilla en cada fracción se mide de forma indirecta utilizando un densímetro de Bouyoucos. Para clasificar la textura del suelo, se hará uso del triángulo textural de la USDA.

$$\% \text{ Arena} = \left(100 - \frac{\text{1era lectura corregida}}{\text{peso de la muestra}}\right) \times 100$$

$$\% \text{ Arcilla} = \left(\frac{\text{2da lectura corregida}}{\text{peso de la muestra}}\right) \times 100$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla})$$

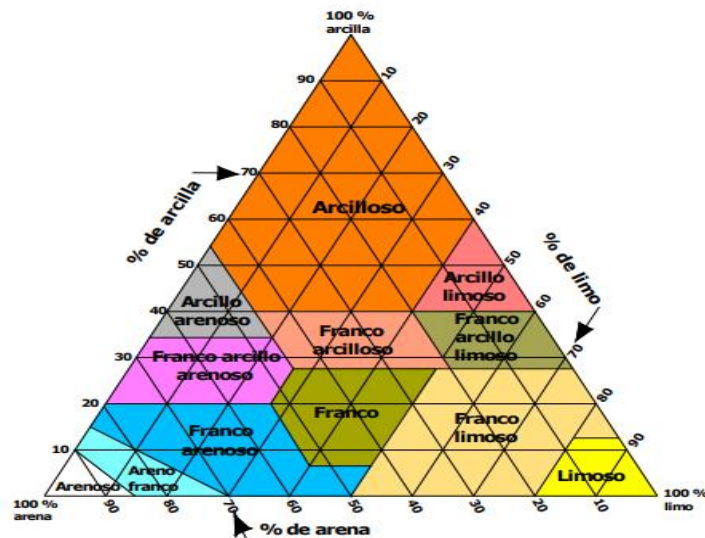


Figura 12. Imagen del triángulo textural de la USDA

5.7.3. Variables químico del suelo

Determinación de pH: Para determinar el pH del suelo relación 1:2.5(suelo: agua), se realizó utilizando el potenciómetro que se realiza colocando una suspensión de suelo y agua destilada en contacto con un electrodo de vidrio muy sensible a la concentración de iones de hidrogeno.

El procedimiento que se hizo fue el siguiente: se pesaron 10 g de suelo y agrego a un beaker de 40 ml, se agregaron 25 ml de agua destilada consecutivamente se revolvió con una varia de vidrio, dejándolo en reposo por 30 minutos. Se calibro el potenciómetro con soluciones buffer de pH 4.0 y 7.0. seguidamente se volvió a agitar levemente la muestra que está en el beaker y se introdujo cuidadosamente el electrodo hasta la estabilización del potenciómetro.

Determinación de MOS: Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) se empleó la metodología de Walkey y Black (1934). Este método se basa en una titulación volumétrica de óxido-reducción por retroceso, en la cual la materia orgánica del suelo es oxidada mediante un exceso de oxidantes. La determinación se realiza

calculando, mediante retroceso, la cantidad de dicromato que no ha sido reducido por la materia orgánica, utilizando una solución de sulfato ferroso.

$$CO = \frac{(V \text{ blanco} - V \text{ muestra}) \times M_{Fe^{2+}} \times 0.003 \times 100 \times f}{w}$$

$$\%MO: CO\% \times 1,724$$

Donde:

CO% = Porcentaje de carbono orgánico

V_{blanco} = volumen de titulante utilizado en el blanco, mL

V_{muestra} = volumen de titulante utilizado en la muestra, mL

M_{Fe²⁺} = concentración de solución estandarizada de FeSO₄, molaridad

Determinación del nitrógeno del suelo: Para determinar el nitrógeno del suelo se basará en el 5% de la materia orgánica presente.

Se aplicará la siguiente formula:

$$N = M.O\% \times 5\%$$

M.O = Porcentaje de materia orgánica

5% = constante del contenido de nitrógeno en la materia orgánica

Determinación del fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn): La extracción de macronutrientes se llevó a cabo utilizando la solución extractora Mehlich III, una solución multiparamétrica que permite determinar los niveles de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn).

Después de tamizar las muestras, se pesaron 5 gramos de suelo en matraces Erlenmeyer de 125 ml. A continuación, se añadieron 25 ml de la solución extractora Mehlich III a cada matraz y las muestras fueron agitadas durante 10 minutos en un agitador de vaivén. Tras este proceso, se procedió a la extracción de las muestras utilizando un embudo y

papel filtro Whatman 42 para filtrar completamente el contenido. Finalmente, las muestras fueron analizadas mediante un espectrofotómetro de absorción atómica.

5.7.3. Variables biológicas del suelo

Tabla 7. Procedimiento de muestro para análisis biológico

Paso	Descripción del proceso
1. Selección de Puntos de Muestreo	Se seleccionaron aleatoriamente varios puntos de muestreo dentro del área de estudio, utilizando un método de muestreo aleatorio simple. Cada punto de muestreo fue marcado con estacas para facilitar la localización y evitar que el muestreo se repita en la misma área. Se calcula un mínimo de tres puntos de muestreo para asegurar una representatividad adecuada.
2. Extracción de Muestras de Suelo	En cada punto de muestreo, se procedió a la extracción de un cubo de suelo de 25 cm x 25 cm con una profundidad de 30 cm, utilizando una pala, piocha y barra. El procedimiento se realizó de la siguiente manera: - Marcado y Corte del Área : Primero, se marcó cuidadosamente el área a extraer, asegurando que las dimensiones del cubo fueran exactas. Con la barra y la pala, se cortaron los bordes del cubo de suelo para definir los límites. - Extracción del Cubo : Una vez definidos los límites, se utilizó la piocha para aflojar el suelo alrededor del cubo, permitiendo una extracción controlada. El cubo de suelo se extrajo con cuidado, asegurándose de mantener su integridad para no perturbar la estructura interna. - División del Cubo : Para facilitar el conteo y análisis de las especies, el cubo extraído se dividió en tres partes iguales de 10 cm de altura cada una. Esta división permitió una mejor observación y determinación de los organismos presentes en diferentes estratos del suelo (Anexo 11).

3. Identificación y Cuento de Macrofauna	Una vez extraídas las muestras, se procedió a desmenuzar cuidadosamente los cubos de tierra sobre una lona o superficie limpia. Este proceso se llevó a cabo con el fin de identificar y contabilizar las especies de macrofauna presentes en cada una de las tres partes del cubo de suelo. Se registró el número de individuos de cada especie en una tabla de datos, asegurando una observación meticulosa para capturar todas las especies presentes en las muestras (Anexo 12).
4. Devolución del Suelo al Lugar	Tras la identificación y conteo de las especies, la tierra fue cuidadosamente devuelta al lugar de origen, en el mismo orden en que se extrajo, parte por parte. Este paso se realizó para asegurar que el suelo y su estructura fueran restaurados lo más fielmente posible a su estado original, minimizando así cualquier impacto negativo en la zona de muestreo.
5. Cálculo del Índice de Shannon	Con los datos recolectados del conteo de especies, se procedió a calcular el índice de Shannon (H'), el cual se utiliza para evaluar la biodiversidad del suelo. Este índice se calculó utilizando la fórmula $H' = -\sum (p_i * \ln(p_i))$, donde p_i es la proporción de individuos de cada especie en relación al total de individuos encontrados en cada muestra. Este cálculo permitió evaluar la abundancia, riqueza y diversidad de especies en los puntos de muestras seleccionadas.
6. Documentación y análisis	Todos los datos, observaciones y condiciones fueron documentados meticulosamente en un cuaderno de campo. Los resultados obtenidos se analizaron comparativamente entre los diferentes puntos de muestreo para determinar la heterogeneidad de la macrofauna del suelo en el área de estudio.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1. Etapa 1. Creación del diseño e implementación del mismo

6.1.1. Tipo de suelo

El tipo de suelo según (Brito 2012), los suelos de la parte sur del país Luviosoles son suelos profundos con buena capacidad de retención de agua. Se encuentran principalmente en las áreas de llanuras y colinas, y se utilizan para la agricultura de cultivos como el maíz y el frijol. El suelo de la parcela es predominantemente franco arenoso según los análisis entregados por la universidad de nacional de agricultura, ofreciendo un buen equilibrio entre drenaje y retención de agua. Según la FAO (2010), este tipo de suelo es adecuado para la implementación de sistemas agroforestales como el MIAF, siempre y cuando se aplica prácticas que mejoren la conservación de la humedad como el principio keyline.

6.1.2. Mapa de uso del suelo

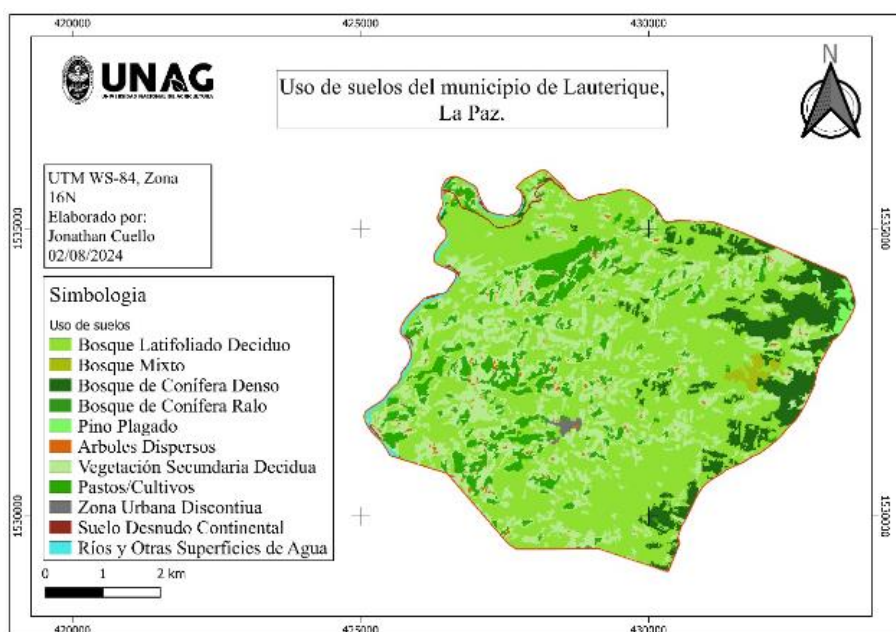


Figura 13. Mapa de uso de suelos del municipio Lauterique, La Paz.

El análisis del uso de suelos en el municipio de Lauterique, representado en el mapa, destaca que la cobertura dominante es el bosque latifoliado deciduo, el cual alberga especies leñosas de alto valor como el cedro (*Albizia carbonaria*), la caoba (*Swietenia macrophylla*) y (*Gliricidia sepium*). Este tipo de cobertura sugiere un potencial considerable para la producción de biomasa, la cual podría ser utilizada tanto en la regeneración de suelos como en la conservación de la biodiversidad, tal como se discute en estudios sobre el manejo sostenible de recursos forestales en zonas forestales semiáridas (FAO, 2010).

Además, la presencia de vegetación secundaria decidua, resultado de la intervención agrícola y ganadera, evidencia la conversión de bosques antiguos en tierras agrícolas. Estas áreas ofrecen una oportunidad única para la implementación de sistemas agroforestales que favorecen la restauración ecológica y la sostenibilidad agrícola.

6.1.3. Vegetación de la zona

Según informe de (Municipalidad Lauterique 2013) el 60 % es de cobertura forestal y lo demás está en ganadería y agricultura, La parcela está cubierta por vegetación típica del Corredor Seco, incluyendo especies como *Casearia nitida* y *Acacia picachensis*, que son fundamentales para la protección del suelo contra la erosión y el mantenimiento de la biodiversidad local, según Gómez et al (2020) la integración de especies locales ayuda a la conservación de los sistemas agroforestales.

6.1.4. Origen de las especies

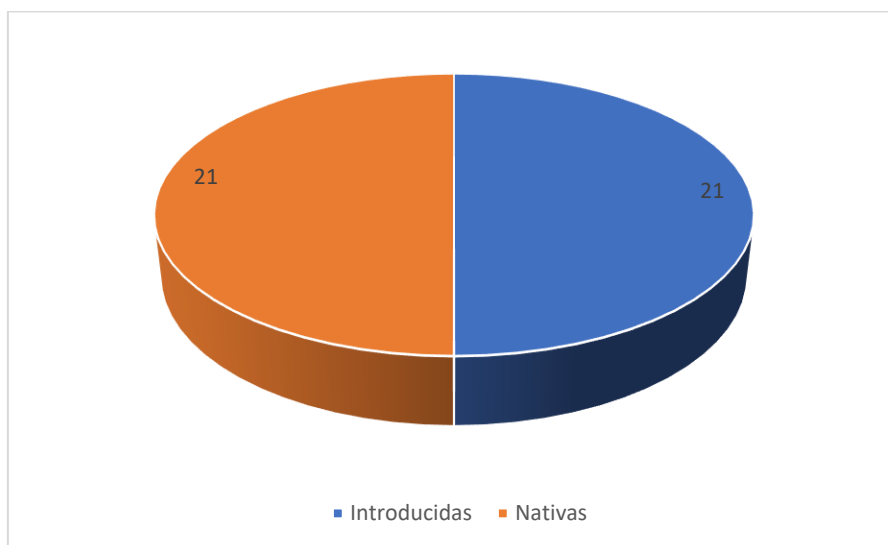


Figura 14. Gráfico del origen de las especies identificadas en el municipio de Lauterique, La Paz.

La investigación realizada ha identificado un conjunto de especies vegetativas clasificadas en cuatro grupos principales: frutales, hortalizas, aromáticas-medicinales, y otras especies alimenticias como las gramíneas. Estas especies, muchas de las cuales son nativas de la región de Lauterique, La Paz, desempeñan un papel fundamental en la estructura y funcionalidad del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF).

La FAO (2013) ha subrayado la importancia de los cultivos locales tradicionales en la seguridad alimentaria global, reconociendo su contribución para el mantenimiento de la biodiversidad y la resiliencia de los agroecosistemas. En este contexto, las especies nativas presentes en Lauterique no solo ofrecen un alto valor nutricional, sino que también son clave para la promoción de equilibrios ecosistémicos. Las tablas de identificación de especies muestran que estas plantas, al ser autóctonas, están mejor adaptadas a las condiciones locales, lo que maximiza su potencial de éxito dentro del sistema MIAF.

6.1.5. Identificación de especies

Tabla 8. Tabla de identificación de especies frutales en Lauterique, La Paz.

Nombre Común	Nombre científico	Meses de cosecha	Usos principales	Forma principal de consumo
Marañón	Anacardium occidentale	Febrero a Mayo	Alimentación	La fruta directamente y la semilla después de secarla
Tamarindo	Tamarindus indica	Enero a Abril	Alimentación	La fruta directamente
Mamey	Pouteria sapota	Febrero a Mayo	Alimentación	La fruta directamente
Mandarina	Citrus reticulata	Diciembre	Alimentación	La fruta directamente
Nance	Byrsonima crassifolia	Junio a agosto	Alimentación	La fruta directamente
Mango paste	Mangifera indica	Mayo a Junio	Alimentación	La fruta directamente
Anona	Annona squamosa	Marzo a Mayo	Alimentación	La fruta directamente
Chatas	Musa acuminata	Todo el año	Alimentación	La fruta directamente
Aguacate	Persea americana	Marzo a Junio	Alimentación	La fruta directamente
piñuela	Bromelia pinguin	Todo el año	Alimentación	La fruta directamente
Piña	Ananas comosus	Junio a Septiembre	Alimenticio	La fruta directamente
Jicaro	Crescentia cujete	Todo el año	Alimenticio	Aceite de la semilla
Papaya	Carica papaya	Septiembre y marzo	Alimenticio	La fruta directamente
Cocos	Acrocomia aculeata	Todo el año	Alimenticio	El agua de la fruta
Guayaba	Psidium guajava	Junio a septiembre	Alimenticio	La fruta directamente, en refresco

Limón	Citrus limon	Mayo a octubre	Alimenticio	Refresco, la fruta directamente, té
Ganabana	Anona muricata	Todo el año	Alimenticio	Refresco, la fruta directamente
Mamon	Melicoccus bijugatus	Mayo y agosto	Alimenticio	La fruta directamente
Jocote	Spondias purpurea	Marzo-mayo	Alimenticio	La fruta directamente, en dulce
Limon mandarina	Citrus limonia	× Diciembre	Alimenticio	La fruta directamente

Tabla 9. Tabla de identificación de especies de hortalizas en Lauterique, La Paz.

Nombre Común	Nombre científico	Familia	Meses de cosecha	Usos principales	Forma principal de consumo
Ayote	Cucurbita moschata	Cucurbitáceas	Todo el año	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
Tomate	Solanum lycopersicum	Solanaceae	Todo el año	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
Chile verde	Capsicum annum	Solanaceae	Todo el año	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
Camote	Ipomoea batatas	Convolvulaceae	Todo el año	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
Yuca	Manihot esculenta	Euforbiáceas	Todo el año	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
Cilantro	Coriandrum sativum	Apiaceae	Todo el año	Alimenticio	Aromática y como acompañante culinario

Chilillo	Capsicum spp	Solanaceae	Todo año	el	Alimenticio	En verdura y como acompañante culinario
-----------------	--------------	------------	----------	----	-------------	---

Tabla 10. Tabla de identificación de especies medicinales, aromáticas y condimentos en Lauterique, La Paz

Nombre Común	Nombre científico	Familia	Meses de cosecha	Usos principales	Forma principal de consumo
Zacate de limón	Cymbopogon citratus	Poaceae	Todo el año	Medicinal, aromático	Infusiones para aliviar dolores estomacales y nerviosos
Savila	Aloe vera	Asphodelaceae	Todo el año	Medicinal	Como hidratante, quemaduras e inflamaciones
Jengibre	Zingiber officinale	Zingiberaceae	Octubre a enero	Medicinal, aromático, condimentario	Infusiones para tos,
Valeriana	Valeriana officinalis	Caprifoliaceae	Marzo a agosto	Medicinal	Infusiones para promover el sueño y reducir el estrés
Culantro	Eryngium foetidum	Apiaceae	Todo el año	Condimentario	Las hojas directamente para condimentar alimentos
Quiebra piedra	Phyllanthus niruri	Phyllanthaceae	Todo el año	Medicinal	Infusiones y té para curar las piedras en los riñones

Achote	Bixa orellana	Bixaceae	Noviembre a febrero	Colorante	Uso de la semilla como colorante en los alimentos como pollo, sopas, arroz etc
Curcuma	Curcuma longa	Zingiberaceae	Mayo a julio	Condimento	En la cocina como condimento y colorante.

Tabla 11. Tabla de identificación de especies de gramíneas en Lauterique, La Paz.

Nombre Común	Nombre científico	Familia	Meses de cosecha	Usos principales	Forma principal de consumo
Maicillo	Sorghum bicolor	Poaceae	Mayo - Agosto	Alimenticio	En forma de tortillas, tamales, y atoles.
Frijol (Rojo)	Phaseolus vulgaris	Fabaceae	Mayo - Agosto	Alimenticia	Cocidos en guisos y acompañando arroces.
Frijol (Blanco)	Phaseolus vulgaris	Fabaceae	Mayo - Agosto	Alimenticia	Cocidos en guisos y acompañando arroces.
Frijol (Cuarentano)	Phaseolus vulgaris	Fabaceae	Mayo - Agosto	Alimenticia	Cocidos en guisos y acompañando arroces.
Maiz blanco	Zea mays	Poaceae	Mayo - Agosto	Alimenticia	En forma de tortillas, tamales, y atoles.
Maiz amarillo	Zea mays	Poaceae	Mayo - Agosto	Alimenticia	En forma de tortillas, tamales, y atoles.
Chipilin	Crotalaria longirostrata	Fabaceae	Todo el año	Alimenticio	Las hojas directamente

Por ejemplo, los frutales como el mango (*Mangifera indica*), el aguacate (*Persea americana*), y la papaya (*Carica papaya*) no solo proporcionan alimentos ricos en nutrientes, sino que también actúan como elementos estabilizadores del suelo y contribuyen a la regulación del microclima. Estas especies, cuando se integran en un sistema MIAF, permiten un uso más eficiente del espacio y los recursos, lo que se traduce en una mayor productividad y sostenibilidad del sistema. Según (Arauz y Vásquez 2018) las especies de servicio en los sistemas agroforestales tienen múltiples funciones clave que contribuyen al éxito y la sostenibilidad del sistema productivo. Estas especies no solo proporcionan bienes como leña o frutos, sino que también juegan un papel crucial en la mejora del suelo, el control de plagas, la provisión de sombra y la regulación hídrica.

En el caso de las hortalizas como el tomate (*Solanum lycopersicum*) y el chile (*Capsicum annuum*), su cultivo intercalado con frutales en el sistema MIAF ayuda a diversificar la dieta y a generar ingresos adicionales para los agricultores, al mismo tiempo que optimiza el uso del agua y los nutrientes disponibles. Estas plantas, al ser cultivadas en combinación con árboles frutales, aprovechan las interacciones beneficiosas entre especies, como la sombra parcial y la mejora de la estructura del suelo (Montagnini & Somarriba 2015)

Las plantas aromáticas y medicinales, como la sábila (*Aloe vera*) y la cúrcuma (*Curcuma longa*), aportan un valor añadido al sistema MIAF. Además de sus usos tradicionales en la medicina y la cocina, estas especies contribuyen a la conservación de la biodiversidad y actúan como repelentes naturales de plagas, lo que reduce la necesidad de pesticidas químicos y promueve un manejo más sostenible del agroecosistema. Finalmente, las gramíneas como el maíz (*Zea mays*) y el sorgo (*Sorghum bicolor*), que son pilares de la alimentación local, juegan un papel esencial en la rotación de cultivos dentro del sistema MIAF. Estas plantas mejoran la fertilidad del suelo a través de la adición de materia orgánica, y su cultivo continuo asegura la estabilidad económica de las familias rurales (Murillo & León 2018).

El concepto de etnobotánica, tal como lo describen (Ruíz y Zuniga 2020), es crucial para entender la relación histórica y cultural que las comunidades locales tienen con estas especies. La etnobotánica estudia e interpreta la historia de las plantas en las sociedades, tanto antiguas como actuales, lo que ha permitido el desarrollo de estudios que destacan el conocimiento tradicional sobre las propiedades alimenticias y medicinales de estas plantas. Este conocimiento ha sido fundamental para seleccionar especies locales que no solo tienen un mayor potencial de éxito en su desarrollo dentro del sistema MIAF, sino que también aportan un alto valor nutricional a las comunidades.

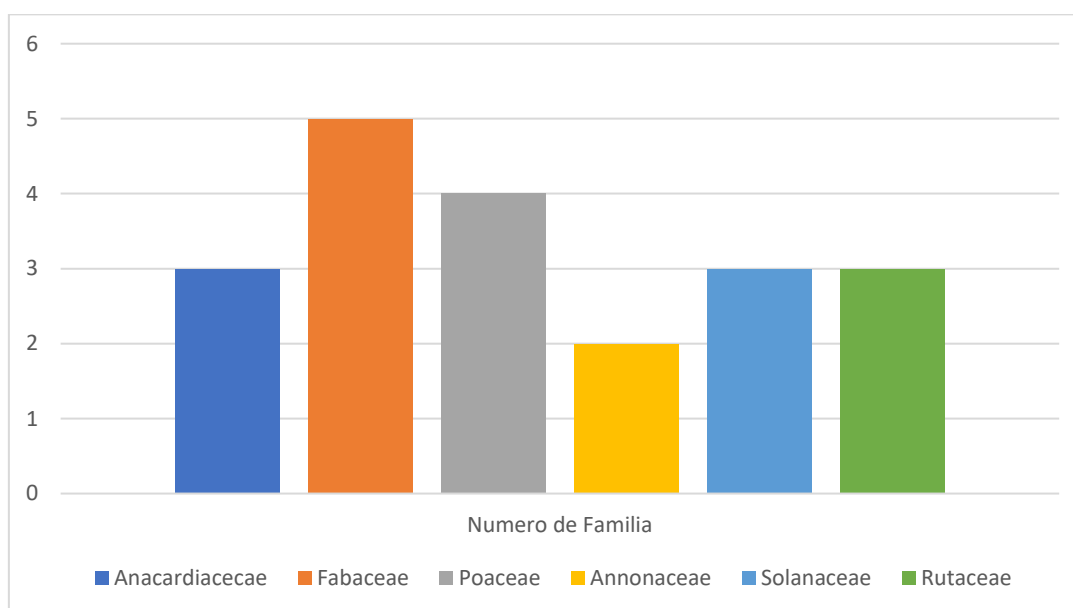


Figura 15. Gráfico de las familias botánicas con potencial alimenticio más representativas en la zona

En la (Figura 15) se puede observar el grupo de familia más representativo en la zona, el cual fue el fabaceae, el cual se analizó que al ser la familia con 5 especies diferentes siendo el más dominante en el municipio, Las especies de familia fabaceae o leguminosas son especies fijadora de nitrógeno, esto quiere decir que la determinación precisa del nitrógeno fijado simbióticamente a través de *rhizobium* por la leguminosas es esencial para conocer el papel de estas en la mejora de los agro sistemas y el mantenimiento de los niveles de nitrógeno en el suelo (Bellido Luis, 2010).

6.1.6. Descripción de los cultivos integrados para el establecimiento del Sistema MIAF

Tabla 12. Descripción de los cultivos utilizados en el MIAF

Especie	Descripción Biológica	Relación con el Sistema MIAF	Cita
Zea mays (Maíz)	Planta anual de la familia Poaceae, con tallos altos y robustos. Produce mazorcas con granos comestibles.	Es una de las especies principales en los sistemas MIAF debido a su alto valor nutricional y su capacidad de ser intercalada con otras especies.	Munyuli, 2013
Phaseolus vulgaris (Frijol)	Leguminosa anual con semillas comestibles. Es una fuente importante de proteínas.	El frijol es utilizado en sistemas MIAF para fijar nitrógeno en el suelo, mejorando la fertilidad y beneficiando a cultivos como el maíz.	Onamu et al., 2024
Musa × paradisiaca (Plátano)	Híbrido estéril de plátano, de la familia Musaceae. Sus frutos son ricos en carbohidratos y fibra.	Integrado en sistemas MIAF, proporciona sombra y contribuye a la regulación del microclima, mejorando las condiciones para otros cultivos.	Vael, 2015
Citrus limon (Limón)	Árbol frutal perenne de la familia Rutaceae, produce frutos cítricos ricos en vitamina C.	Su cultivo en sistemas MIAF ayuda en la diversificación de productos agrícolas y en el control natural de plagas debido a sus propiedades repelentes.	Diemont et al., 2021
Citrullus lanatus (Sandía)	Planta herbácea rastrera de la familia Cucurbitaceae, produce frutos grandes y jugosos.	Cultivada en sistemas MIAF, puede contribuir a la retención de humedad en el suelo y a la diversificación de cultivos comerciales.	Talucder et al., 2024

6.1.7. Mapa de red hídrica

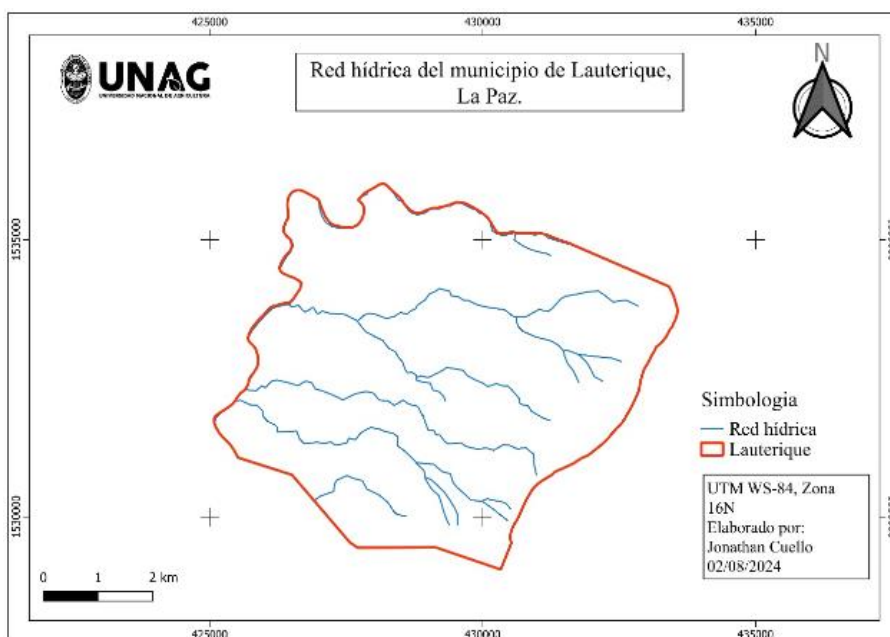


Figura 16. Mapa de la red hídrica de Lauterique, La Paz.

La falta de un sistema de riego en la región hace que la mayoría de los agricultores dependan de la precipitación estacional, lo cual tiene un impacto directo en los tiempos de producción, concentrando las actividades agrícolas entre mayo y septiembre, cuando las lluvias son más frecuentes. Esta estacionalidad limita la capacidad de cultivar durante otros meses del año, afectando la planificación del sistema MIAF.

La producción realizada entre febrero y mayo, antes del inicio de la temporada de lluvias, enfrenta desafíos significativos debido a la escasez de agua. Según Juan Barrios (2018), la capacidad de identificar y gestionar las fuentes de agua es crucial para mitigar estos desafíos. En el caso específico de la parcela donde se implementó el sistema MIAF, la cercanía a una quebrada representa una ventaja estratégica. Esta proximidad ofrece la posibilidad de conectar el sistema de cultivo directamente con la fuente de agua, mejorando la disponibilidad de agua durante los meses secos y optimizando su uso a lo largo del año.

En la investigación visualiza cómo esta conectividad puede ser aprovechada en el diseño del sistema MIAF, proporcionando un respaldo hídrico en períodos críticos. La

integración de un sistema de captación de agua en la parcela podría ser un componente clave del MIAF, asegurando que la producción no se vea tan afectada por la variabilidad climática, lo cual es crucial para mejorar la resiliencia del sistema y promover una agricultura más sostenible en la región.

6.1.8. Precipitación

Tabla 13. Promedio de precipitaciones del 2000 a 2019

Años	Precipitación Anual
2000	1430,39
2001	971,409
2002	1248,802
2003	1625,5573
2004	1394,043
2005	1606,282
2006	1321,932
2007	1642,72
2008	1926,95
2009	1439,077
2010	1962,033
2011	1875,125
2012	1558,768
2013	1428,42
2014	1421,863
2015	1256,204
2016	1354,705
2017	1564,523
2018	1197,964
2019	1238,386
Promedio	1473,26

Los datos muestran un promedio anual de 1,473,26 estimado por un rango de años desde el 2000 al 2019. A su vez se pueden observar en los datos fluctuaciones en la cantidad anual, con un pico en 2009 y otro en 2018. Esto se muestra que en un corredor seco se caracteriza por periodos prolongados de sequía y lluvias irregulares, lo que afecta negativamente la producción agrícola los sistemas agroforestales son una

estrategia efectiva para mitigar estos efectos, ya que promueve la diversificación de cultivos y el uso eficiente de recursos, como el agua (Anabraba & Pakiribo, 2015).

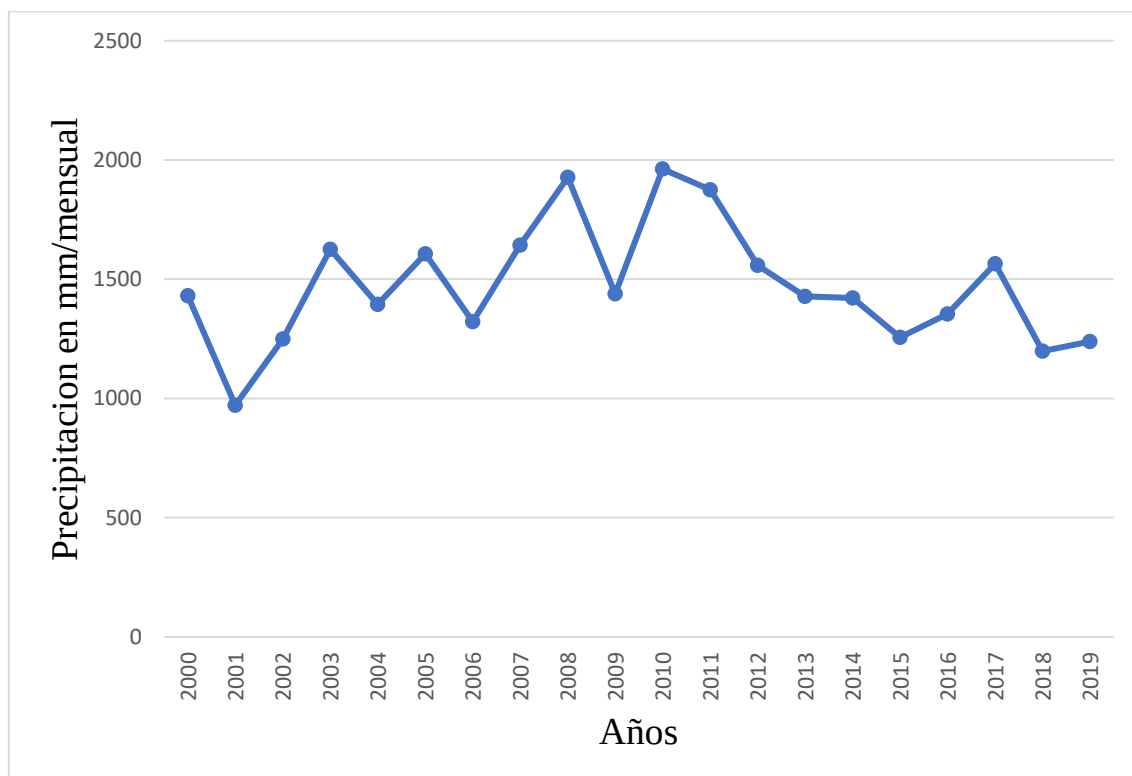


Figura 17. Precipitaciones anuales de la zona de Lauterique (Giovanni, 2019)

En este contexto, la integración de cultivos perennes y sistemas agroforestales en el MIAF no solo proporciona estabilidad en la producción al aprovechar la humedad del suelo de manera más eficiente, sino que también ayuda a mitigar la erosión y conservar el agua, especialmente durante los años de alta precipitación (Lal, R. 2009).

Sin embargo, en los años con precipitaciones significativamente bajas, como 2001 y 2018, se hace evidente la necesidad de riego suplementario para mantener la productividad del sistema. La planificación agrícola en el MIAF debe, por lo tanto, tener en cuenta estas fluctuaciones, ajustando los ciclos de siembra y cosecha y utilizando técnicas de almacenamiento de agua para garantizar la sostenibilidad y la seguridad alimentaria en la región a largo plazo.

En el contexto del sistema MIAF, esta alta evapotranspiración (ETP) en la región Sur significa que el suelo y los cultivos enfrentan problemas de disponibilidad de agua, lo que aumenta la necesidad de sistemas de captación y conservación de agua. Sin un manejo adecuado de los recursos hídricos, la eficacia del MIAF podría verse comprometida, especialmente durante la estación seca. Por lo tanto, la implementación de técnicas como la captación de agua de lluvia, la construcción de zanjas de infiltración, y el uso de coberturas vegetales que reduzcan la evaporación del suelo son cruciales para mantener la sostenibilidad del sistema.

Además, la selección de especies dentro del sistema MIAF debe considerar estas condiciones climáticas. Especies que son más tolerantes a la sequía o que tienen menores requerimientos hídricos serían más adecuadas para regiones con alta evapotranspiración, y prolongadas estaciones secas. Asimismo, la integración de árboles frutales que puedan proporcionar sombra y reducir la temperatura del suelo podría ayudar a mitigar los efectos de la alta evapotranspiración, creando un microclima más favorable para los cultivos intercalados.

6.1.9. Pendiente del terreno y curvas a nivel

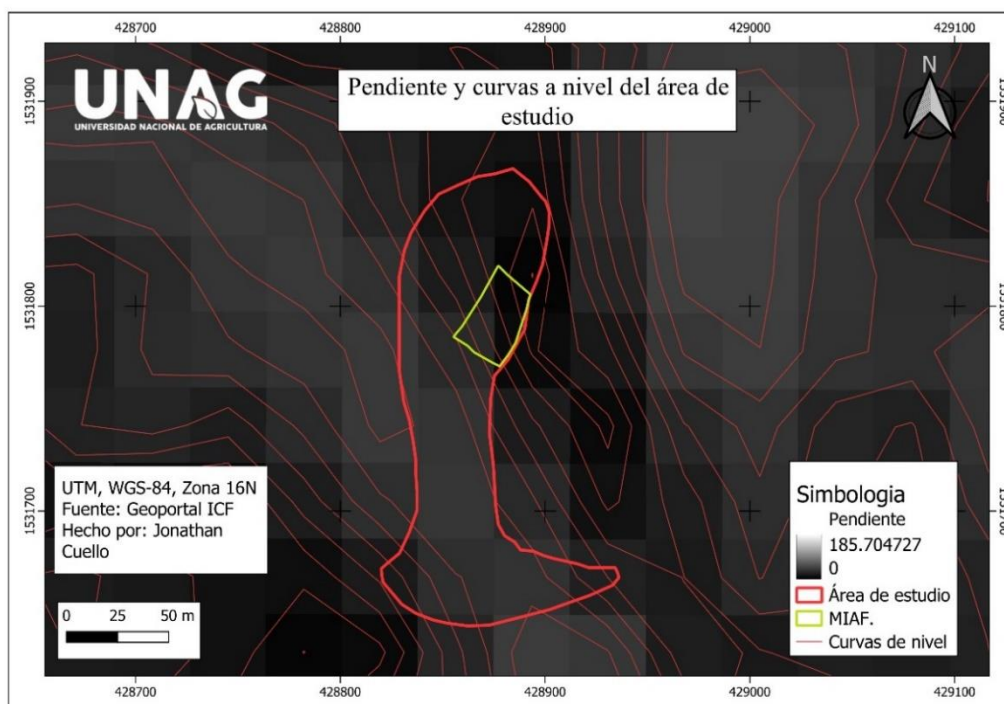


Figura 18. Mapa de pendiente y curvas a nivel en el área de estudio.

Como se puede observar en la (figura 18) que nos representa los intervalos de las curvas a nivel a 5 m de altura y la pendiente se presenta siendo el color más claro los puntos más altos y los colores más oscuros las zonas más bajas, con el nivel de manguera (Anexo 4) el resultado de la pendiente el MIAF fue de 25% lo que indica una pendiente moderada

El manejo de pendientes en terrenos agrícolas es crucial para evitar la erosión y maximizar la eficiencia del riego y más en las condiciones en las que se implementó el MIAF, según el informe de CIAT (2016), la construcción de terrazas y zanjas en pendientes similares puede reducir significativamente la pérdida de suelo y mejorar la eficiencia del riego en sistemas agroforestales.

6.1.10. Potencial de Escurrimiento de la Parcela

Se calculó el potencial de escurrimiento de la parcela con los datos del área total de la parcela (1,008 m²). El coeficiente de escurrimiento (Ce) se estimó tomando en cuenta la pendiente del terreno (25%), el uso del suelo (Cultivo Agrícola) y la textura del suelo (media = 0.70). Se consideró una precipitación anual (Pm) de 122.77 mm y el Área del Terreno (A).

El volumen de escurrimiento se calculó utilizando la fórmula:

$$V_m = C_e \times P_m \times A$$

Donde:

$$V_m = 0.70 \times 122.77 \text{ mm} \times 1,008 \text{ m}^2$$

El resultado del volumen de escurrimiento es:

$$V_m = 86,398.07 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

6.1.11. Diagrama de flujo del sistema MIAF

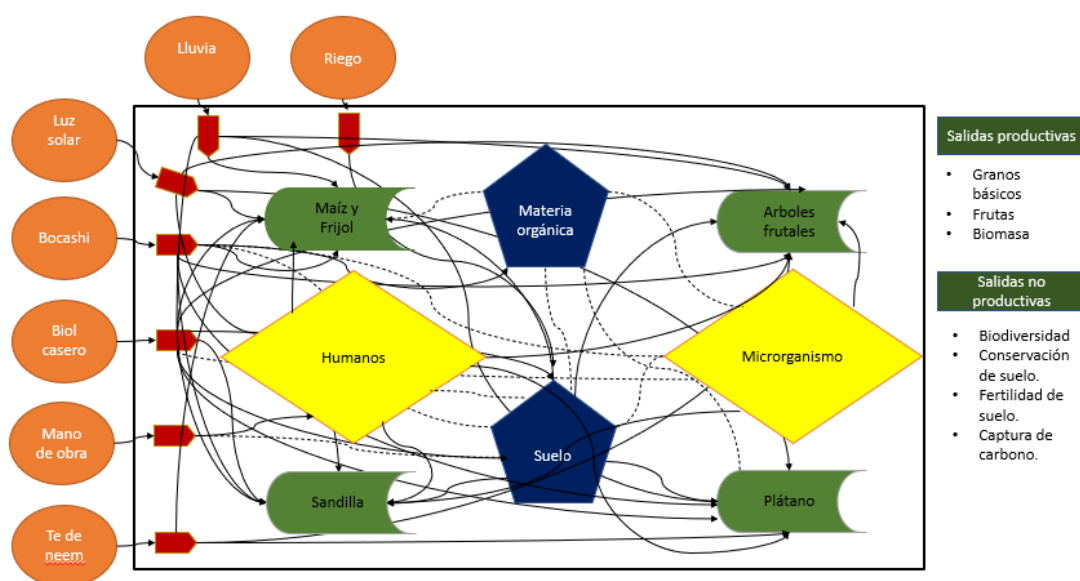


Figura 19. Diagrama de flujo de la parcela donde se estableció el sistema MIAF

El sistema agroforestal representado en el diagrama muestra cómo la integración de diversas prácticas agrícolas, como el uso de insumos orgánicos (Bocashi y biol casero) y la gestión del agua (mediante riego y conservación de humedad), puede mejorar la productividad de cultivos como maíz, frijol, sandía y plátano, al mismo tiempo que promueve la sostenibilidad del suelo y la biodiversidad (Mairata et al., 2024).

Esta sinergia de prácticas contribuye no solo a la producción de granos básicos y frutas, sino también a la captura de carbono y la conservación del suelo, lo que es crucial en zonas semiáridas como Lauterique. De manera similar, estudios realizados en sistemas agroforestales en América Latina, como el de (Zamora et al., 2019), destacan la importancia de integrar la gestión del suelo y el agua para mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a variaciones climáticas, asegurando la estabilidad de la producción y la salud del ecosistema.

6.1.12. Croquis del sistema

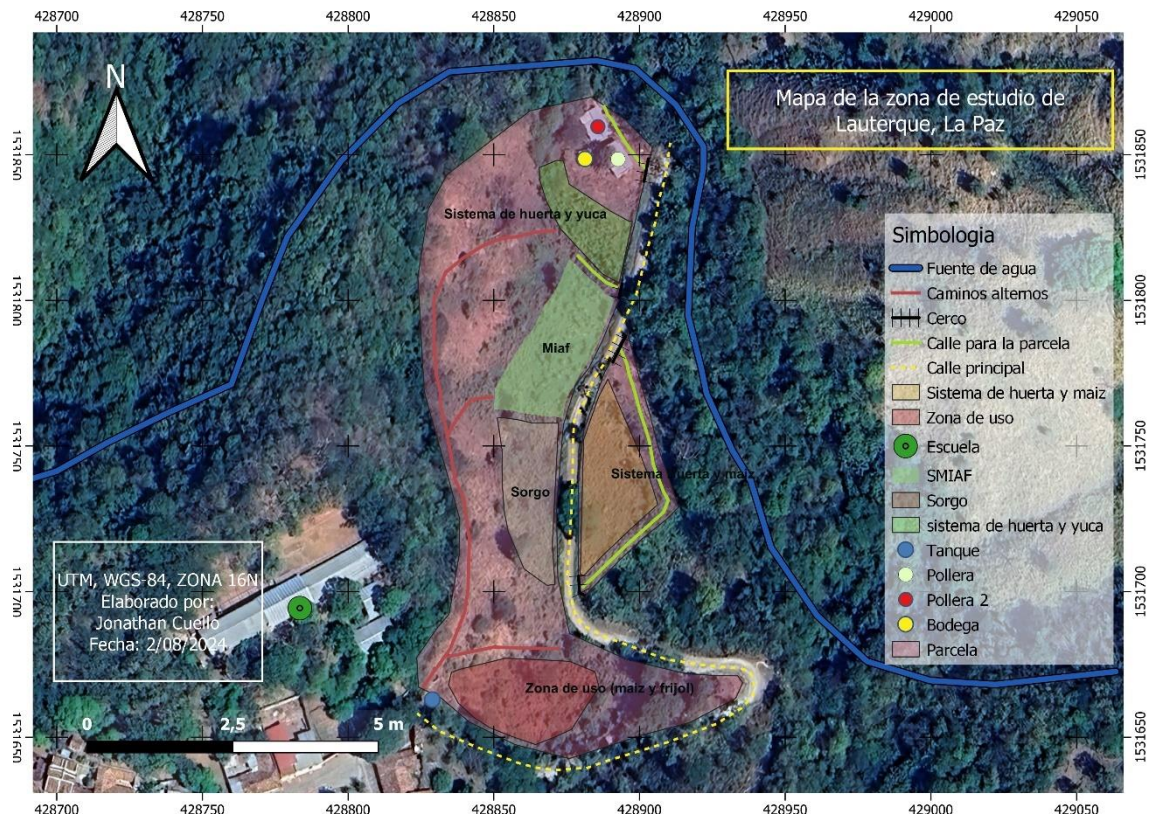


Figura 20. Mapa de los diferentes componentes de la zona en estudio en Lauterique, La Paz.

La parcela se conformaba de 5 componentes que son: Es sistema de huerta con yuca, la pollera, el sorgo. Sistema huerta con maíz, una milpa y el sistema MIAF. Se observa que existe bastante área de maíz y frijol, como podemos ver en la zona de usos, no siempre se. cultiva, pero siempre que se hace son estos dos cultivos, lo cual producen buena cantidad de biomasa la cual contribuye tanto al suelo como en el tema de malezas, así que toda materia seca que se encontraba de manera local se incorporó en el sistema MIAF cubriendo al menos el 80% del área.

6.1.13. Enfoque de sistema

El enfoque sintrópico adoptado en el sistema MIAF se basa en la creación de un entorno que imita la estructura y funcionalidad de un bosque natural (Andrade et al., 2020). Este tipo de sistema permite un uso más eficiente de los recursos disponibles y crea un entorno más resiliente y sostenible, lo que es crucial para mantener la productividad a largo plazo. Según un estudio de (FAO 2019), los sistemas agroforestales que integran múltiples especies en un entorno de bosque mejoran significativamente la biodiversidad y la eficiencia en el uso de recursos, promoviendo un ciclo de nutrientes cerrado y reduciendo la necesidad de insumos externos.

6.1.14. Principio Keyline

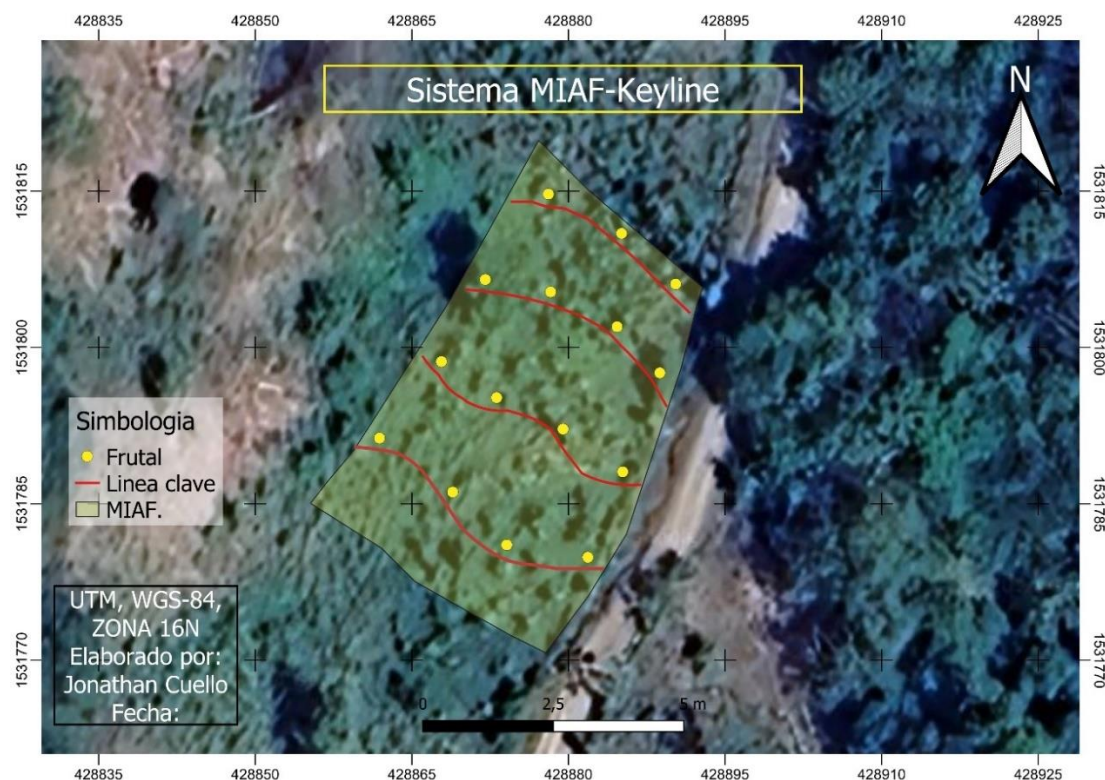


Figura 21. Mapa del diseño hidrológico Keyline en la parcela de establecimiento del sistema MIAF

La gestión del agua y la conservación del suelo son componentes críticos en el diseño del sistema MIAF. La implementación de líneas clave o keylines en la plantación de árboles frutales maximiza la retención de agua, reduce la escorrentía y minimiza la erosión del suelo. Esta práctica es esencial para proteger el suelo y asegurar su fertilidad a largo plazo, como se observa en el libro de (Smith et al. 2020), que destaca la importancia de la gestión del agua en sistemas agroforestales para mantener su productividad y sostenibilidad.

6.1.15. Movimiento del agua

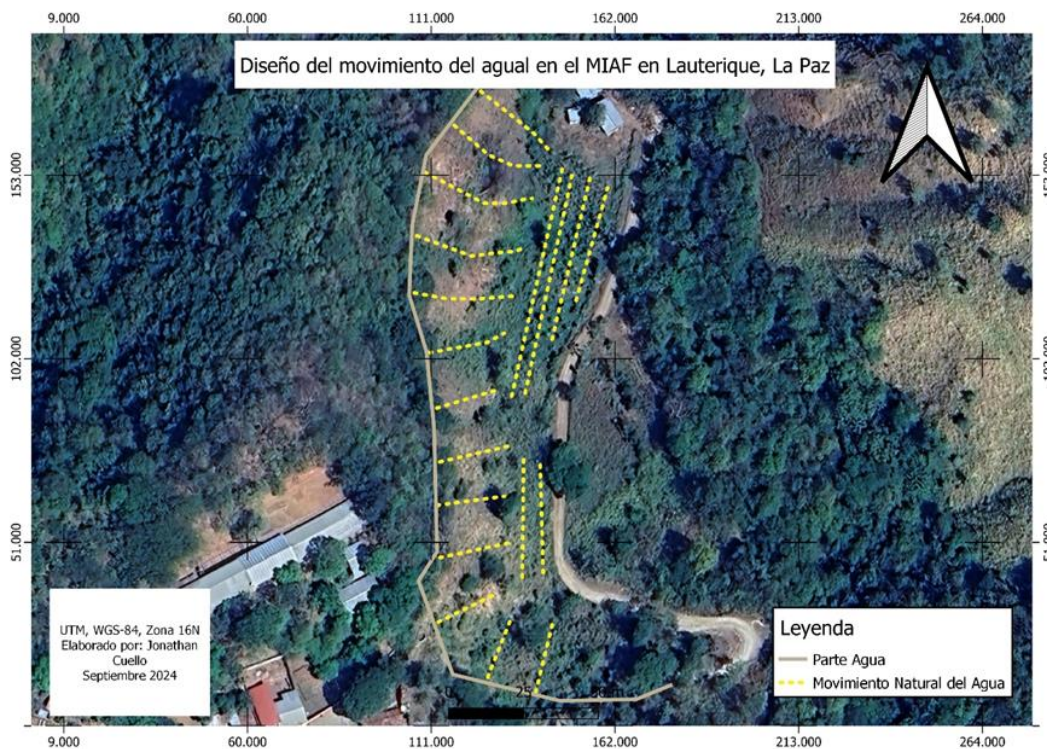


Figura 22. Mapa del movimiento natural del agua en la parcela de establecimiento del Sistema MIAF y alrededores.

El diseño del movimiento de agua en el sistema MIAF, como el mostrado en la imagen, tiene un papel crucial en la gestión de los recursos hídricos en áreas con pendientes pronunciadas. En este contexto, la implementación de curvas a nivel y zanjas de

infiltración es esencial para reducir la velocidad de la escorrentía, permitir una mayor infiltración en el suelo y, por ende, aumentar la disponibilidad de agua para los cultivos.

Según el Manual de Estudio y Ejercicios Relacionados con el Contenido de Agua (Universidad de Chile, 2012), las laderas son zonas críticas para el manejo del agua debido a la rápida escorrentía que puede causar erosión severa del suelo y la pérdida de nutrientes. El documento sugiere que la implementación de zanjas de infiltración y sistemas de captación puede ayudar a mitigar estos efectos al retener parte del agua de lluvia para su uso en temporadas secas. En el sistema MIAF, este enfoque es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los cultivos y la conservación del suelo.

Además, el estudio del Impacto de la Agricultura en los Sistemas Fluviales (Ministerio de Agricultura de España, 2020) señala que la relación entre las laderas y el ciclo hidrológico es clave en la productividad agrícola. El documento destaca cómo la intervención en laderas, mediante la construcción de infraestructuras de manejo de agua, como las zanjas o los bordes vivos, puede mejorar la captación de agua, reduciendo la erosión y maximizando la eficiencia del recurso hídrico disponible. Este principio puede aplicarse en la imagen del MIAF, donde las zanjas de infiltración ayudan a mantener el equilibrio hídrico en un terreno inclinado.

Por otro lado, el Manual de Conservación de Suelos (Martínez et al. 2017) enfatiza la importancia de la conservación del suelo mediante la adecuada gestión del agua. Señala que las pendientes superiores al 2% requieren un diseño especial para evitar la pérdida de agua y la erosión del suelo, como se muestra en la imagen del MIAF en Lauterique. La implementación de prácticas conservacionistas no solo aumenta la eficiencia del uso del agua, sino que también mejora la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos en el largo plazo.

6.1.16. Capacidad de recolección de agua en los canales o líneas claves.

Tabla 13. Ejercicio de capacidad de recolección de agua en los canales o líneas claves establecidos.

PASO	FÓRMULA	CANAL 1	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 4
HIPOTENUSA	$c^2 = a^2 + b^2$	$\sqrt{(0.2^2 + 0.2^2)}$ = 0.2828 m	$\sqrt{(0.2^2 + 0.2^2)} =$ 0.2828 m	$\sqrt{(0.2^2 + 0.2^2)}$ = 0.2828 m	$\sqrt{(0.2^2 + 0.2^2)} =$ 0.2828 m
ÁREA DEL CANAL	$A = 1/2 * \text{base} * \text{altura}$	$1/2 * 0.2 * 0.2$ = 0.02 m ²	$1/2 * 0.2 * 0.2$ = 0.02 m ²	$1/2 * 0.2 * 0.2$ = 0.02 m ²	$1/2 * 0.2 * 0.2$ = 0.02 m ²
VOLUMEN DEL CANAL	$V = A * \text{longitud}$	$0.02 \text{ m}^2 * 17.5 \text{ m}$ = 0.350 m ³	$0.02 \text{ m}^2 * 21.4 \text{ m}$ = 0.428 m ³	$0.02 \text{ m}^2 * 23.7 \text{ m}$ = 0.474 m ³	$0.02 \text{ m}^2 * 25.5 \text{ m}$ = 0.510 m ³
VOLUMEN EN LITROS	$V \text{ litros} = V * 1000$	$0.350 \text{ m}^3 =$ 350 L de agua	$0.428 \text{ m}^3 =$ 428 L de agua	$0.474 \text{ m}^3 =$ 474 L de agua	$0.510 \text{ m}^3 =$ 510 L de agua

1,762 m³ es la cantidad recolectada en escorrentía en cada línea clave

6.1.17. Diseño del sistema MIAF -Keyline.

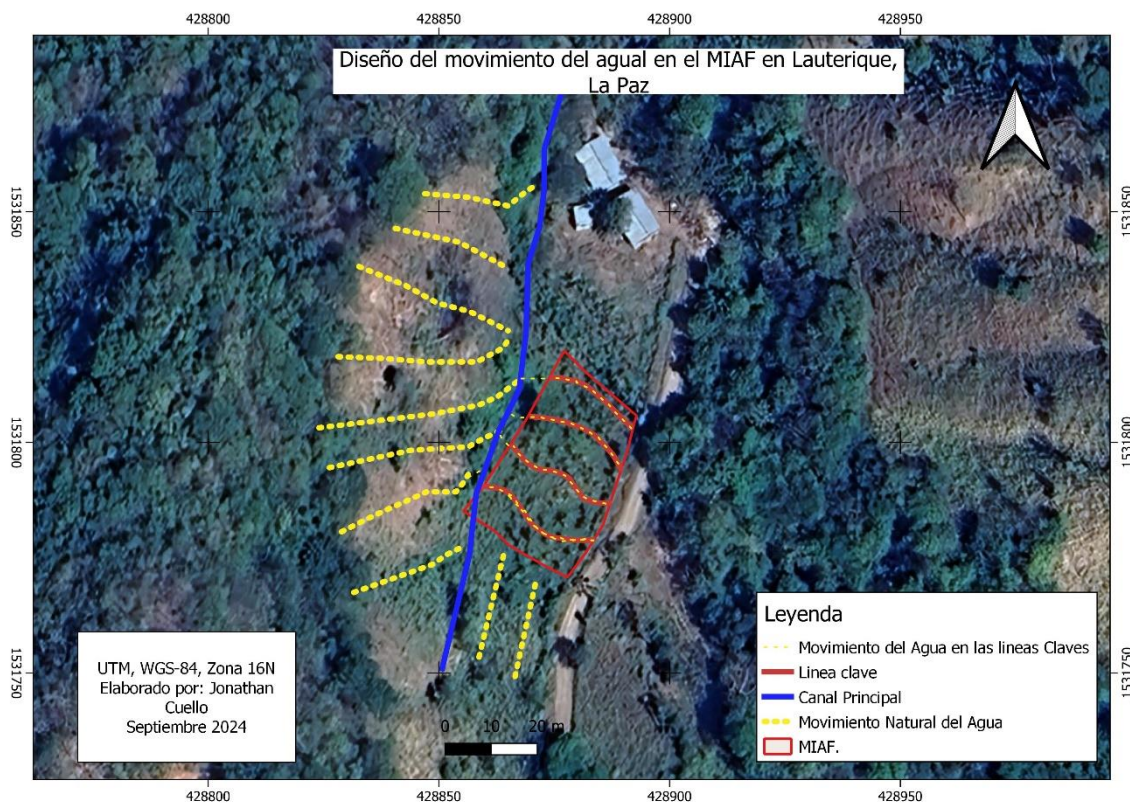


Figura 23. Diseño del sistema MIAF en conjunto con los elementos físicos y obras en el relieve a escala dentro del sitio en estudio

El sistema MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) se desarrolla como una estrategia agroecológica que integra diversas especies adaptadas al entorno local. Las especies seleccionadas, como *Zea mays* (maíz), *Phaseolus vulgaris* (frijol), *Musa × paradisiaca* (plátano), *Citrus limon* (limón) y *Citrullus lanatus* (sandía), son clave en la adaptación del sistema a las condiciones climáticas de la región, especialmente por su capacidad para aprovechar eficientemente la radiación solar, mejorar la productividad, el aporte de los nutrientes esenciales con valor nutricional (Espinoza-Pérez et al., 2024). Estas plantas juegan un papel clave en la seguridad alimentaria global y el desarrollo sostenible, especialmente en sistemas de agricultura familiar y en regiones donde se practican métodos agroecológicos (Esquivel-Fariña et al., 2024).

Este enfoque asegura una mayor resiliencia del sistema frente a fluctuaciones climáticas, como se discute en el informe de la (FAO 2013), que subraya la importancia de diversificar los cultivos en sistemas agrícolas para mejorar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad. El sistema MIAF también asegura una sucesión de especies que facilita una producción continua de alimentos. Al combinar especies anuales como el maíz y el frijol con especies perennes como los árboles frutales, se crea un ciclo de nutrientes sostenible que se mantiene gracias a la reincorporación de materia seca residual al suelo (Pérez et al., 2024).

Esta práctica no solo enriquece el suelo, sino que también reduce la necesidad de insumos externos, lo que es fundamental para la sostenibilidad del sistema. Según el estudio de (FAO 2020), la integración de materia orgánica en sistemas agroforestales es crucial para mejorar la fertilidad del suelo y mantener la sostenibilidad agrícola a largo plazo. Este enfoque participativo no solo refuerza la adopción de prácticas sostenibles, sino que también fortalece la resiliencia de las comunidades frente a desafíos climáticos y económicos (FAO y el Banco Mundial ,2020).

Hay algo muy interesante en la ubicación la parcela, se puede notar que en la fuente de agua o quebrada toda la parte que sigue la línea de agua se mira con una buena densidad de vegetación, al estar la parcela tan cerca de la quebrada contribuye con la humedad, mantenía que el suelo y los cultivos se mantuvieran con buena humedad.

6.2. Etapa 2. Medir variables agroecológicas en sistema milpa intercalado con árboles frutales

6.2.1. Análisis de cobertura

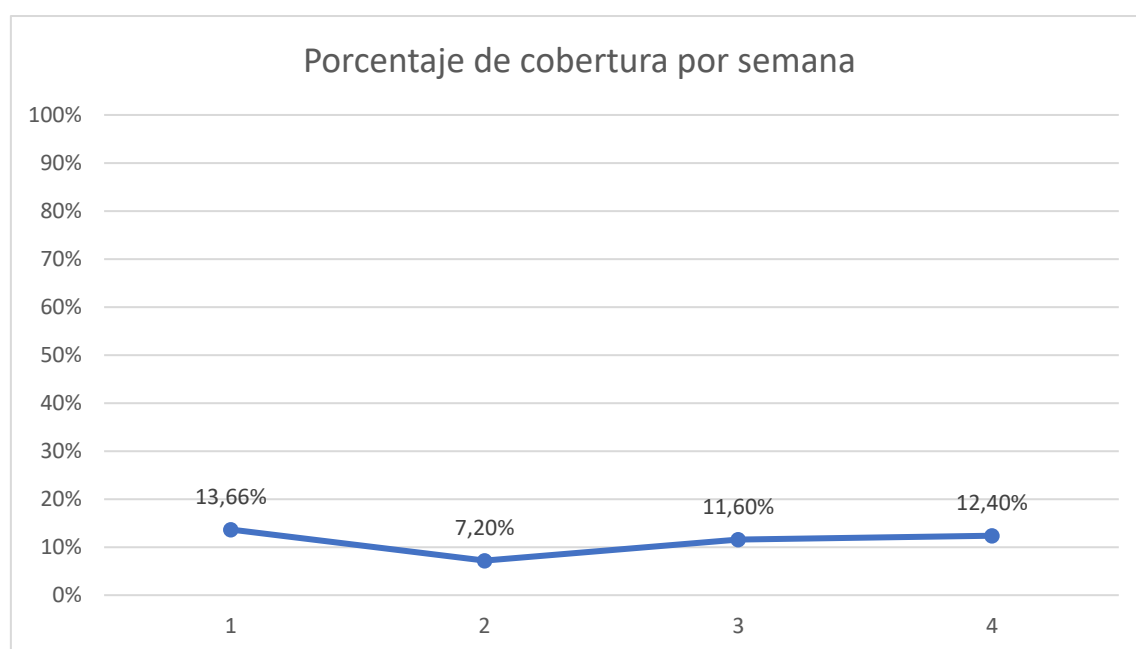


Figura 23. Gráfico del porcentaje de cobertura por cada semana.

De acuerdo con (Yaisys Blanco 2017) los arvenses, conocidas como malezas, pueden competir de manera significativa con los cultivos económicos, afectando negativamente sus rendimientos. Sin embargo, dentro del marco teórico de la agricultura sostenible, los arvenses no solo son vistas como competidoras, sino como componentes esenciales para mejorar la estabilidad de los agroecosistemas.

(Crespo et al. 2010) subraya la importancia de la cobertura vegetal viva en la protección del suelo frente a la erosión, resaltando cómo la biomasa vegetal y los rastrojos actúan como barrera contra el escurrimiento del agua, reduciendo las pérdidas de suelo. Las coberturas vegetales también contribuyen a mejorar las propiedades físicas y biológicas del suelo, aportando materia orgánica que enriquece su fertilidad (Ligña, 2014).

En el contexto del sistema MIAF, el manejo estratégico de los arvenses mediante la implementación de coberturas secas y verdes es una práctica esencial para mantener la integridad ecológica del suelo. Según (Canales Ramírez y Carrillo Hernández 2018), el uso de coberturas vegetales muertas y semicompostadas reduce la necesidad de labranza y mejora las propiedades físicas y biológicas del suelo. La evaluación de la cobertura vegetal se realizó utilizando un cuadrante de cobertura, lo que permitió cuantificar las especies más dominantes y calcular los porcentajes de cobertura en el sistema. En la primera medición, la cobertura alcanzó un 13,66%, un valor que disminuyó a 7,2% en el segundo muestreo, esto debido a la incorporación de materia seca sobre el suelo (Anexo 11).

El uso de cobertura seca, especialmente durante la temporada de lluvias, es una estrategia crítica dentro del sistema MIAF para prevenir la erosión hídrica y conservar la estructura del suelo (Hernández 2015). Según la (FAO 2024), la cubierta vegetal es un componente clave en la agricultura de conservación, ya que protege el suelo del impacto directo de las gotas de lluvia y mantiene niveles óptimos de humedad en el perfil del suelo. En el marco del sistema MIAF, estas prácticas no solo minimizan la competencia entre arvenses y cultivos, sino que también potencian la fertilidad del suelo al incrementar el contenido de materia orgánica, resultado de la división de la cobertura vegetal.

En sistemas agrícolas, la utilización de coberturas vegetales vivas, ha demostrado reducir significativamente la contaminación de las aguas subterráneas, dado que ayudan a evitar el lixiviado de nutrientes, en particular de nitratos, hacia el subsuelo (Rodríguez-Lizana et al., 2005). Además, el manejo de residuos vegetales, como los tallos y hojas de plátano eliminados durante la preparación del terreno, es un componente vital para la regeneración del suelo y el mantenimiento de los principios ecológicos del MIAF. Estos residuos fueron procesados mediante picado fino, facilitando su rápido separación y la posterior liberación de nutrientes en el suelo (Anexo 12). Este enfoque está alineado con los principios de la agricultura regenerativa, que busca cerrar ciclos de nutrientes y aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo, mejorando su capacidad de retención de agua y su estructura física (Rodale institute, 2020).

6.2.2. Análisis de cobertura por especie

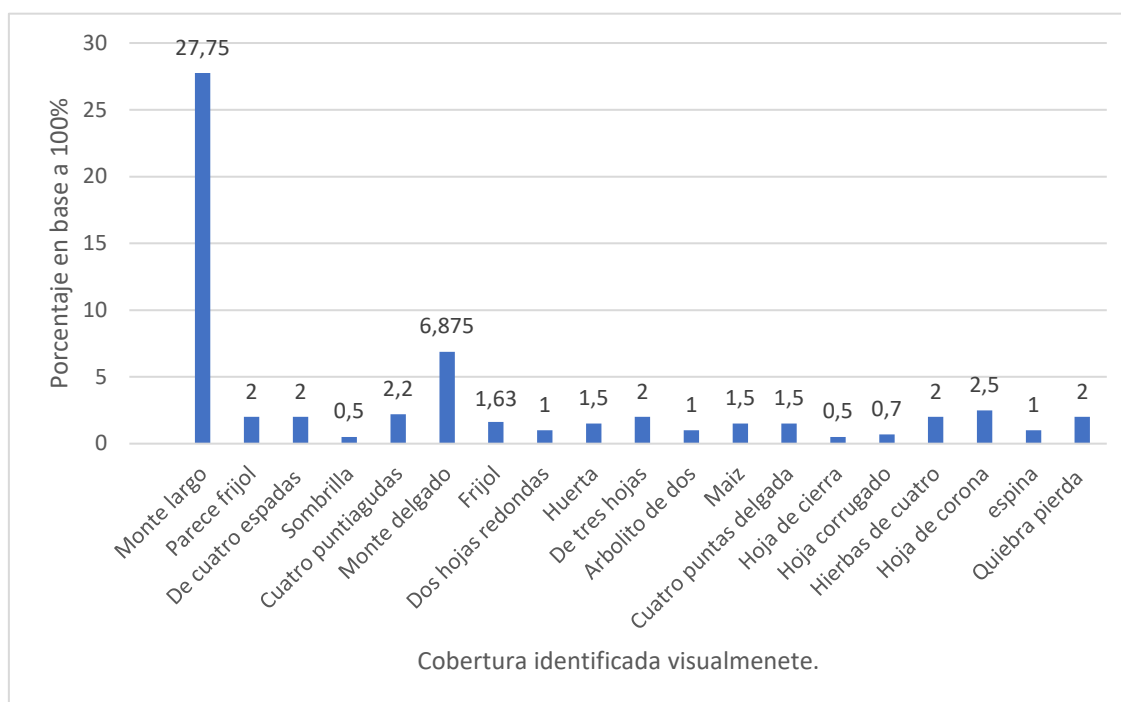


Figura 24. Gráfico de los arvenses más dominantes en el sistema MIAF.

Las condiciones del terreno, especialmente la humedad y la temperatura, son factores determinantes en el crecimiento y desarrollo de las malezas. En climas secos como el del municipio de Lauterique, las altas temperaturas y la baja disponibilidad de humedad durante el verano contribuyen a la reducción de la maleza, ya que muchas especies muestran una notable resiliencia a las condiciones áridas. Esta dinámica sugiere que, durante la temporada seca, la implementación de coberturas verdes podría facilitar el control de arvenses, al reducir la competencia por recursos esenciales como el agua, y así mantener un equilibrio en el sistema agrícola (Kaur & Chauhan, 2023).

Tal como se muestra en la (Figura 23) la especie de arvense que demostró mayor resiliencia en estas condiciones es el monte, con un 27,75% de cobertura, seguida por el monte delgado con un 6,87%, y las cuatro puntiagudas con un 2,2%. El monte es la especie predominante debido a su capacidad para desarrollarse eficazmente en condiciones cálidas, lo que la convierte en una de las malezas más resistentes. Las

demás especies de arvenses identificadas se mantuvieron en porcentajes relativamente bajos dentro del sistema (Anexo 11).

6.3. Etapa 3. Medir la salud de los frutales de acuerdo a su estado fenológico.

6.3.1. Análisis de grados brix en los limones (*Citrus limon*)

Tabla 14. Datos de los grados brix en los frutos de limón (*Citrus limón*)

Cultivo	Condición	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Limón	Tratado	3.8	5.2	6.0	7.6
	Tratado	3.7	5.9	7.0	8.0
	Tratado	4.0	6.0	6.4	9.0
	Tratado	4.5	5.4	7.1	8.5

Las plantas de limón mostraron una evolución positiva en los grados Brix a lo largo del período de aplicación de los bioles y su concentración de materia orgánica. Se observó que, con el tiempo, las hojas presentaban brotes nuevos, más frondosos y de un color verde más intenso, lo cual es un indicativo visual de la mejora en la salud de las plantas. Los valores de grados Brix, obtenidos mediante el uso de un refractómetro, reflejan un aumento en la concentración de solutos, lo que sugiere un mejor estado nutricional y un ajuste metabólico adecuado por parte de las plantas.

Según Adriana Celi (2020), en su estudio el aumento de grados Brix o SST en el tratamiento 0.5 ET0, que alcanzó 8.63 grados Brix en condiciones de época seca, podría asociarse a un estrés moderado en los árboles de limón. Este estrés moderado, que alcanzó un 34% de estrés hídrico, 2 puntos porcentuales inferior a la capacidad de campo (CC) del 36%, sugiere que los limoneros ajustaron su uso de carbohidratos para producir más azúcares y así mantener suficiente ATP para activar sus procesos metabólicos sin perjudicar el rendimiento. Este ajuste metabólico es clave para la resiliencia de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico moderado. En algunos municipios de El Salvador, Honduras y Guatemala, la humedad del suelo no supera en promedio el 25%, lo que

subraya la necesidad de estrategias de manejo de suelos que aumenten la capacidad de retención de humedad (García, 2020).

Los valores obtenidos de la savia con un máximo de 8.5 grados Brix en el último muestreo que se realizó (Tabla 6), son comparables a los resultados de Celi, validando la estrategia de riego leve en condiciones secas y la incorporación de materia orgánica que ayuda a la retención de agua. De manera similar, estudios como los de (Huang et al. 2000) y el análisis en mandarinas Satsuma y cítricos (Harehime' (Kurose et al., 2016) también muestran un incremento de sólidos solubles bajo estrés hídrico controlado, lo que sugiere que el manejo del riego en el sistema MIAF no solo es eficiente para conservar agua, sino que también promueve una mayor concentración de nutrientes en la fruta.

Al analizar estos hallazgos coinciden con estudios sobre la respuesta eco-fisiológica de los cítricos bajo estrés hídrico y al ser esta una zona con bajos niveles de humedad se puede aprovechar ya que se ha demostrado que la acumulación de sólidos solubles totales (SST) en frutas cítricas es una estrategia adaptativa para enfrentar el estrés hídrico (Ecophysiological Responses of Citrus Trees, 2020).

Además, el principio de conservación del agua, que es central en el sistema MIAF, asegura que se mantengan niveles de humedad suficientes para evitar el estrés hídrico severo, mientras se maximiza la eficiencia del uso del agua disponible. La combinación de nivel de riego, conservación de la humedad mediante coberturas vegetales, y la ubicación estratégica cerca de quebradas, permitió que los limones desarrollaran una buena defensa natural contra plagas y enfermedades, como se evidencia en la ausencia de plagas después de las primeras semanas.

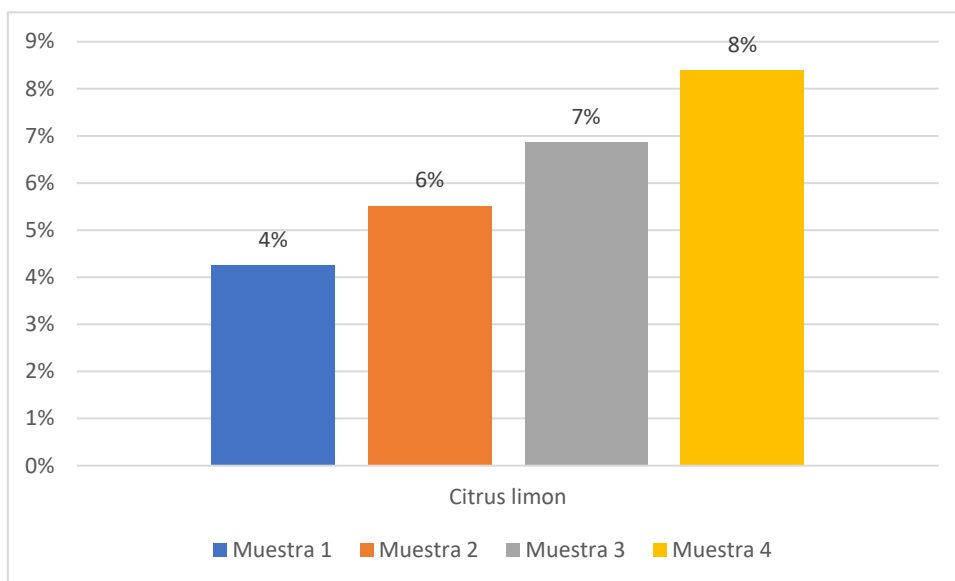


Figura 25. Grafica de porcentaje de grados brix de acuerdo al tiempo.

Gráfico presentado ilustra la evolución de los grados Brix en las plantas de limón tratadas a lo largo de cuatro muestras diferentes. A medida que avanzan las semanas, se observa un incremento constante en los grados Brix, alcanzando su punto máximo en la cuarta muestra. Este comportamiento sugiere que las plantas de limón, bajo el tratamiento aplicado y el riego leve mejoraron su concentración de azúcares y nutrientes con el tiempo, lo que es un claro indicativo de un ajuste metabólico positivo y de una salud vegetal en progreso.

Durante el estudio, se identifican dos fases fenológicas principales en las plantas de limón: **Brote 1 (B1)** y **Brote 2 (B2)**. **B1** representa la fase inicial de brotación, donde las hojas empiezan a emerger. En el gráfico, esta fase se refleja en las primeras dos muestras, donde los grados Brix son relativamente bajos, fluctuando entre 4% y 6% (Anexo 3). Este nivel es característico de las primeras etapas de desarrollo, donde las plantas están comenzando a establecer su capacidad fotosintética y, por lo tanto, la acumulación de solutos aún es moderada.

El desarrollo reproductivo de los limones, tal como se describe en el estudio sobre *Citrus aurantifolia* Swingle de (Ramirez 2024), destaca la importancia de las fases fenológicas

en la acumulación de azúcares en los frutos. Durante la transición de fases fenológicas, como la de primordios a la cosecha del fruto, las plantas experimentan cambios fisiológicos significativos que impactan directamente en la concentración de solutos como los grados Brix, lo que destaca la importancia del manejo nutricional durante todo el ciclo de cultivo para maximizar la calidad del fruto y la salud de la planta (Amado Rondón 2007).

A medida que las plantas progresan hacia la fase **B2**, correspondiente a las muestras tres y cuatro, se observa un incremento notable en los grados Brix, que alcanza niveles entre 6,5% y 9%. **B2** es una fase más avanzada del desarrollo de la planta, donde las hojas están completamente desplegadas y activamente involucradas en la fotosíntesis. Este aumento en los grados Brix indica que las plantas están optimizando su metabolismo, maximizando la producción de azúcares, y demostrando un vigor y salud robustos.

Este proceso se refleja en nuestro análisis, donde las plantas de limón tratadas mostraron un incremento en los grados Brix al pasar de la fase **B1** a **B2**, indicando que las condiciones de cultivo y el manejo agronómico efectivo dentro del sistema MIAF favorecen una mayor acumulación de azúcares. Esta recomendación sugiere que el monitoreo de las fases fenológicas, junto con la aplicación de prácticas de manejo adecuadas, puede optimizar la calidad del fruto en términos de dulzura y valor nutritivo (Caballero et al,2019).

6.4. Etapa 4. Evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

6.4.1. Análisis de textura

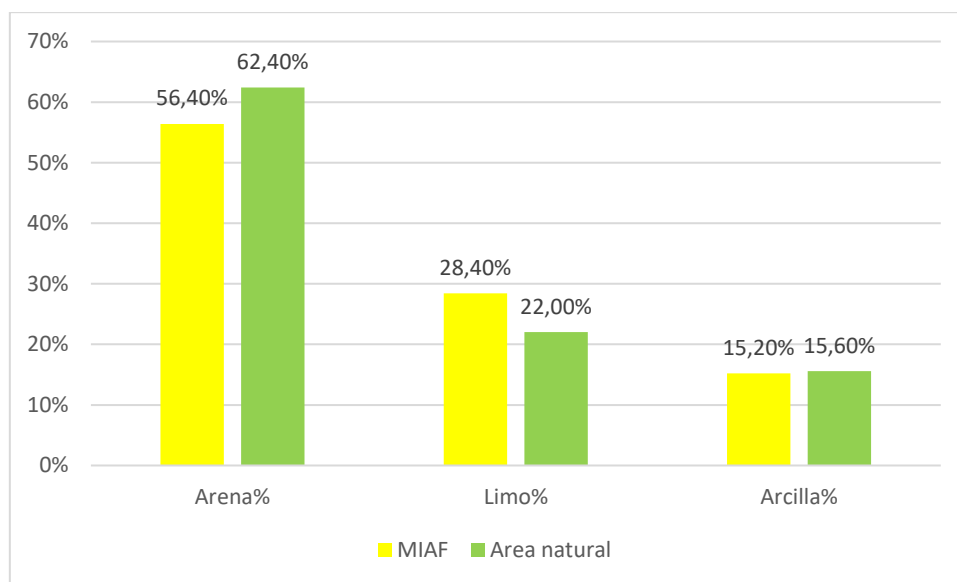


Figura 26. Gráfico de comparación de la textura de suelo en el sistema MIAF y un área natural en el municipio de Lauterique, La Paz.

Arena: El porcentaje de arena es ligeramente menor en el sistema MIAF (56.40%) comparado con el área natural (62.40%). La mayor cantidad de arena en áreas naturales podría indicar una mayor tendencia al drenaje rápido del agua, lo cual es menos favorable para la retención de humedad, crucial en áreas como el corredor seco.

Limo: El sistema MIAF presenta un mayor porcentaje de limo (28.40%) en comparación con el área natural (22.00%). Un mayor contenido de limo podría mejorar la capacidad de retención de agua y nutrientes, lo cual es beneficioso para los cultivos en zonas secas.

Arcilla: Los porcentajes de arcilla son similares en ambas áreas, con una ligera ventaja en el área natural. La arcilla contribuye a la retención de agua y nutrientes, pero en exceso puede dificultar el drenaje y la aireación del suelo (FAO, 2022).

En el corredor seco de Honduras, la productividad agrícola depende en gran medida de la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, dadas las condiciones de sequía prolongada. El sistema MIAF, con su mayor contenido de limo, puede ofrecer ventajas significativas al mejorar la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, lo que puede traducirse en una mayor productividad agrícola en comparación con áreas naturales que tienen un mayor contenido de arena (Maldonado, J. 2021).

6.4.2. Análisis químico

Tabla 15. Resultado de los nutrientes evaluado en el laboratorio de la universidad nacional de agricultura.

Nutrientes	Área natural	MIAF	Unidad
pH	6	6,1	%
MO	2,94%	2,22%	%
N	0,15%	0,12%	%
P	72,24	151,5	Mg/kg
K	1,349	1,499	Mg/kg
Ca	4,876	4,115	Mg/kg
Mg	861,6	568,6	Mg/kg
Fe	351,1	454,7	Mg/kg
Mn	172	177,5	Mg/kg
Cu	6,78	6,09	Mg/kg
Zn	1,1	1,89	Mg/kg

Análisis de pH

El área natural presenta un pH de 6.0, mientras que el sistema agroforestal registra un pH de 6.1. Aunque la diferencia es mínima, estos valores pueden tener implicaciones importantes en la dinámica del suelo y la biodiversidad asociada. Según (Cardona et al. 2017), un pH cercano a la neutralidad, como el que se observa en ambos casos, favorece

la actividad biológica del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno.

El pH de 6.1 en el sistema MIAF podría estar relacionado con una mayor capacidad de retención de nutrientes y una mejor estructura del suelo en comparación con el área natural, donde el pH de 6.0 indica un equilibrio más delicado entre la materia orgánica y los minerales del suelo. (Cerón Rincón 2012) señala que en suelos con pH alrededor de 6.0, los nutrientes como el magnesio y el calcio están disponibles de manera óptima, pero una leve modificación en el pH, como la observada en el sistema agroforestal, puede mejorar la disponibilidad de otros elementos esenciales como el potasio.

Análisis de nitrógeno (N)

Los sistemas agroforestales como el MIAF pueden mostrar variabilidad en los niveles de nitrógeno en comparación con áreas naturales. Esto se debe a las diferencias en la dinámica de la materia orgánica y las prácticas de manejo. Por ejemplo, la incorporación de leguminosas en estos sistemas contribuye al ciclo de nitrógeno, aunque la disponibilidad de este nutriente depende de factores como la tasa de descomposición y la actividad microbiana (Acosta, 2020)

El nitrógeno es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, involucrado en la síntesis de aminoácidos, proteínas y clorofila. En el sistema MIAF, se observa un porcentaje de nitrógeno de 0,12%, mientras que en el área natural es de 0,15%. Esta diferencia puede atribuirse al manejo del suelo y la incorporación de materia orgánica en el sistema MIAF. En sistemas agroforestales, la disponibilidad de nitrógeno puede estar influenciada por la presencia de especies fijadoras de nitrógeno y la gestión de los residuos (Manikandan & Subramanian, 2021).

Según estudios realizados por (Arriaga et al. 2020), los sistemas agroforestales, como el MIAF, pueden mostrar una variabilidad en los niveles de nitrógeno en comparación con áreas naturales debido a las diferencias en la dinámica de la materia orgánica y las prácticas de manejo. La incorporación de leguminosas en sistemas agroforestales, por ejemplo, contribuye al ciclo de nitrógeno, aunque la disponibilidad de este nutriente puede depender de varios factores como la tasa de descomposición y la actividad microbiana.

Análisis de materia Orgánica (MO)

La materia orgánica es crucial para la fertilidad del suelo, mejorando su estructura, capacidad de retención de agua y aportando nutrientes esenciales. En el área natural, el porcentaje de materia orgánica es de 2,94%, mientras que en el sistema MIAF es de 2,22%. Esta ligera disminución podría deberse a la extracción continua de biomasa en el sistema agrícola, lo cual es común en prácticas de cultivo intensivo. Según Roncallo et al. (2012), los sistemas agroforestales tienden a mantener una cantidad considerable de materia orgánica en el suelo, pero la variabilidad puede estar influenciada por la rotación de cultivos y la incorporación de residuos vegetales.

La materia orgánica que contienen los suelos desempeña un papel de gran importancia al incrementar la habilidad del suelo, para retener nutrientes, reducir la compactación, incrementar la capacidad de retención de agua, mejorar la capacidad tampón del suelo (no permite cambios rápidos de pH) y junto a otros ácidos ayuda a transformar en solubles a los minerales del suelo que proporcionan los nutrimentos para las plantas (Duicela et al. 2003).

Análisis de fósforo (P)

El fósforo es un nutriente fundamental para el desarrollo de las raíces y la floración en las plantas. Los resultados muestran un ligero aumento en el contenido de fósforo en el sistema MIAF (151.5 mg/kg) en comparación con el área natural (72.24 mg/kg). Este incremento podría estar asociado a la aplicación de enmiendas orgánicas, como el compost, que liberará fósforo disponible para las plantas. Flores et al. (2021) señalan que el uso de abonos orgánicos en sistemas agroforestales puede aumentar la disponibilidad de fósforo en el suelo, mejorando así la fertilidad y la productividad del sistema.

Análisis de potasio (K)

El potasio es un elemento clave para la regulación de la apertura estomática y la fotosíntesis en las plantas. En el sistema MIAF, el nivel de potasio es ligeramente inferior (1.499 mg/kg) en comparación con el área natural (1.349 mg/kg). Este descenso puede estar relacionado con la extracción continua de potasio a través de la cosecha de cultivos, lo cual es un fenómeno común en sistemas de agricultura intensiva. González et al. (2018) encontraron patrones similares en sistemas agroforestales, donde el contenido de potasio puede disminuir con el tiempo si no se aplican enmiendas adecuadas para reponer este nutriente.

Análisis de Calcio (Ca)

El calcio es vital para la estructura celular de las plantas y la regulación del pH del suelo. En el área natural, los niveles de calcio son significativamente más altos (4.876 mg/kg) en comparación con el sistema MIAF (4.115 mg/kg). Este resultado podría reflejar una mayor lixiviación de calcio en el sistema agrícola debido a prácticas de riego y la posible acidificación del suelo por la aplicación de fertilizantes. (Roncallo et al. 2012) observaron que la lixiviación de calcio puede ser un desafío en sistemas agroforestales, especialmente en áreas con alta precipitación o riego intensivo.

Análisis de Magnesio (Mg)

El magnesio es un componente central de la clorofila y es esencial para la fotosíntesis. El sistema MIAF muestra un nivel más alto de magnesio (568.6 mg/kg) en comparación con el área natural (861.6 mg/kg). Este aumento puede deberse a la aplicación de cargas minerales o al uso de cultivos de cobertura que ayudan a retener el magnesio en el suelo. Orellana et al. (2020) indican que en sistemas agroforestales bien manejados, es posible mantener o incluso aumentar los niveles de magnesio en el suelo, lo que es beneficioso para la salud de los cultivos.

Análisis de Hierro (Fe)

El hierro es crucial para la síntesis de clorofila y diversas enzimas en las plantas. Los niveles de hierro son relativamente similares entre el área natural (351.1 mg/kg) y el sistema MIAF (454.7 mg/kg). Este equilibrio puede indicar que el manejo del suelo en el sistema MIAF no ha afectado significativamente la disponibilidad de hierro, lo cual es positivo para el mantenimiento de la salud de las plantas. Barraco et al. (2018) señalan que los sistemas agroforestales pueden mantener una disponibilidad estable de hierro en el suelo debido a la constante aportación de materia orgánica.

Análisis de Manganeso (Mn)

El manganeso es necesario para la activación de enzimas y la fotosíntesis en las plantas. En el área natural, el contenido de manganeso es ligeramente mayor (172 mg/kg) que en el sistema MIAF (177.5 mg/kg). Esta pequeña diferencia puede no ser significativa en términos prácticos, pero podría reflejar una menor disponibilidad de manganeso en suelos manejados intensivamente. Roncallo et al. (2012) sugieren que la variabilidad en los niveles de manganeso puede depender de la textura del suelo y las prácticas de manejo adoptadas en el sistema.

Análisis de cobre (Cu)

El cobre es importante para la fotosíntesis, la respiración y la formación de lignina en las plantas. Los niveles de cobre son más altos en el sistema MIAF (6.09 mg/kg) en comparación con el área natural (6.78 mg/kg). Este incremento podría estar relacionado con la aplicación de enmiendas o con la acumulación de cobre en el suelo debido a la baja movilidad de este elemento. Cotler et al. (2016) observan que, en sistemas agroforestales, los niveles de cobre pueden aumentar ligeramente debido a la acumulación en el suelo, lo que puede ser beneficioso para la salud de los cultivos si se maneja adecuadamente.

Análisis de zinc (Zn)

El zinc (Zn) es un micronutriente clave para el crecimiento de las plantas, con funciones esenciales enzimáticas y en la fotosíntesis. En los sistemas MIAF, la mayor actividad

biológica y el aporte de materia orgánica favorecen su disponibilidad, mejorando la mineralización de nutrientes. En contraste, las áreas naturales suelen presentar menor disponibilidad de zinc debido a un manejo del suelo menos intensivo (Escobar 2022).

Dado que el zinc es uno de los nutrientes más limitantes en la producción agrícola, su presencia es crucial para mantener la productividad en sistema El zinc juega un papel crucial en funciones enzimáticas, fotosíntesis, y la producción de proteínas, lo que impacta directamente en el crecimiento y rendimiento de las plantas. Esto explica por qué la disponibilidad de zinc es fundamental para mantener la productividad en sistemas agrícolas como el MIAF (Ruiz, 2017).

6.4.3. Análisis biológico

Tabla 16. Análisis de la macrofauna edáfica encontrada en la parcela del establecimiento del sistema MIAF y un área natural

Especie	Área Natural	MIAF
Lombrices	17	15
Milpiés	7	10
chinchas	4	2
Arañas	2	3
Hormigas	17	14
Zompopos	4	6
Ciempis	6	4
Escarabajos	3	2
Total de riqueza	8	8
Total de abundancia	60	58
Índice de Shannon	1,819	1,829

En la (tabla 16) presentada, se observa semejanzas en ambos Índices de Shannon tanto en el sistema MIAF en comparación con el área natural. Esto denota que las condiciones en ambos sitios de estudio son similares debido al contexto climático y las condiciones edáficas.

El índice de Shannon en sistemas como el MIAF es generalmente alto debido a la integración de diferentes especies y la estructura compleja del sistema. Este aumento en la diversidad puede mejorar la resiliencia del ecosistema, promover la estabilidad ecológica y proporcionar servicios ecosistémicos adicionales, como la mejora del suelo y la captura de carbono (Montoya et al., 2020).

La macrofauna del suelo, en especial las lombrices de tierra, desempeña un papel crucial en la formación de agregados del suelo. Estos organismos movilizan grandes cantidades de tierra a través de sus túneles y de los excrementos que producen, lo cual favorece tanto la aireación como la infiltración del agua en el suelo. Este proceso no solo previene la compactación, sino que también crea un ambiente óptimo para el desarrollo de las raíces de las plantas (Lavelle et al., 2006). Además, la macrofauna se encarga de descomponer la materia orgánica, como las hojas y raíces en descomposición, transformándola en humus y liberando nutrientes importantes como nitrógeno, fósforo y potasio, que son más fácilmente absorbidos por las plantas. Esta acción es esencial para mantener la fertilidad del suelo y garantizar el reciclaje de nutrientes dentro del ecosistema, lo que apoya el crecimiento continuo de la vegetación (Brussaard et al., 2007).

VII. CONCLUSIONES

El diseño del sistema Milpa Intercalado con Árboles Frutales (MIAF) fue realizado bajo un enfoque participativo en conjunto con el conocimiento tradicional de las comunidades de Lauterique con principios agroforestales modernos. Con el establecimiento del sistema se apuesta hacia la seguridad alimentaria, la conservación del suelo y una mayor agrobiodiversidad, lo que promete beneficios futuros en términos de productividad agrícola.

El análisis de las variables agroecológicas durante el periodo de investigación evidenció la importancia de realizar un manejo productivo de la mano de principios agroecológicos como la cobertura vegetal, lo cual tiene un impacto directo al suelo y en las plantas. La combinación de cobertura y manejo agroecológico aplicado, promueve la conservación del suelo del suelo, favoreciendo un ambiente más estable para el crecimiento de los cultivos y frutales.

Los resultados obtenidos sobre la salud de las plantas revelaron que las prácticas empleadas en el Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), como la utilización de bioinsumos, contribuyeron de manera notable a mejorar la condición de los cultivos a lo largo de sus distintas fases fenológicas. Este efecto positivo se evidenció a

través de un incremento en los grados Brix, lo que señala una mayor concentración de nutrientes en las plantas.

Los parámetros físico, químico y biológico del suelo son parámetros importantes esenciales para el desarrollo de los cultivos. Si bien no se observaron grandes incrementos en la productividad de los árboles frutales debido al corto periodo de investigación, pero los datos sugieren que este sistema MIAF tiene un potencial significativo para desarrollar los cultivos gracias a los contenidos en los diferentes elementos.

También estos análisis nos dan un panorama más claro de cómo actuar en el suelo, como el caso del tipo de suelo que por ser un suelo muy arenoso necesita mayor retención del agua que se puede lograr al incorporar materia orgánica al suelo. Además, el índice de biodiversidad, medido a través del índice de Shannon, mostró resultados significativamente iguales de actividad biológica en las parcelas intercaladas en comparación con las áreas naturales.

XIII. RECOMENDACIONES

Monitoreo continuo del crecimiento de los árboles frutales y su integración con los cultivos tradicionales: Debido a que los árboles frutales no alcanzaron la fase productiva durante el periodo de investigación, es fundamental continuar monitoreando su desarrollo a lo largo de los próximos años. Se recomienda realizar evaluaciones fenológicas periódicas para ajustar el manejo agroforestal en función de las necesidades de los frutales y su interacción con los cultivos intercalados.

Ampliar el análisis a más ciclos agrícolas y periodos de sequía: Para obtener resultados más robustos sobre la efectividad del sistema MIAF en la conservación del agua y la mejora del suelo, es necesario ampliar el estudio a lo largo de varios ciclos agrícolas y durante las estaciones secas. Esto permitirá evaluar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones climáticas, lo que es clave en una región tan variable como el corredor seco.

Incorporación de más especies frutales y diversificación de cultivos: Aunque los árboles frutales seleccionados mostraron buenos indicios de adaptación, se recomienda diversificar las especies frutales intercaladas para aumentar la resiliencia del sistema. La introducción de frutales con diferentes ciclos de producción y necesidades de agua puede mejorar la estabilidad económica de los agricultores y optimizar el uso de los recursos naturales.

Capacitación técnica constante a los agricultores locales: Para maximizar el éxito del sistema MIAF, es esencial proporcionar capacitación continua a los agricultores sobre técnicas de manejo del suelo, riego eficiente y control de plagas. Un seguimiento técnico constante garantizará que las prácticas agroecológicas adoptadas se mantengan y se ajusten según sea necesario, promoviendo la sostenibilidad del sistema.

Incorporación de tecnologías de medición avanzada para el monitoreo del suelo y agua: Se recomienda utilizar tecnologías de medición más avanzadas, como sensores de humedad y análisis geoespaciales, para monitorear en tiempo real la disponibilidad de agua y las condiciones del suelo. Esto permitiría un manejo más preciso de los recursos hídricos, especialmente durante los periodos críticos de sequía, optimizando así la eficiencia del sistema MIAF en diferentes condiciones climáticas.

IX. BIBLIOGRAFIA

- Acosta, MB (2021, 17 de febrero). Función del nitrógeno en las plantas y su importancia. EcologíaVerde.<https://www.ecologiaverde.com/funcion-del-nitrogeno-en-las-plantas-y-su-importancia->
- Aguilera, D. 2012. Modelos destacados de transferencia tecnológica para la agricultura en América (en línea). . Consultado 6 nov. 2023. Disponible en www.odepa.gob.cl.
- Albino Garduño, R. (2014). El sistema agroforestal milpa intercalada con árboles frutales (miaf): productividad y optimización económica del maíz y frijol. s.l., s.e.
- Amado Rondón, G., & Rondón, O. (2007). Evaluación de sólidos solubles totales en frutales. INIA. Recuperado de http://sian.inia.gob.ve/inia_divulga/divulga_12/rid12_rondon_23-26.pdf
- Andrade, D., Pasini, F., & Scarano, F. R. (2020). Syntropy and innovation in agriculture. Current Opinion in Environmental Sustainability.
- Antonio Gómez-Espinoza, J; Gómez-González, G. (2006). Saberes tradicionales agrícolas indígenas y campesinos: rescate, sistematización e incorporación a la ieas agrícola indígena and farmers traditional knowledge: rescue, sistematization and incorporation to the ieas. 2. s.l., s.e.
- Arauz-Vásquez, K. (2018). Contribución de los sistemas agroforestales a la sostenibilidad del servicio ecosistémico hídrico en las cuencas de Costa Rica. ***Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo***, 1(1), 23-33. Recuperado de [<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/agroinn/article/download/3932/3536>](<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/agroinn/article/descargar/3932/3536>). 2.

- Arriaga, A., Martínez, M., Rubiños, J., Fernández, D., Delgadillo, J., & Vázquez, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa intercalada con árboles frutales. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 465-477. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Astrada, W. 2015. PROMOVRIENDO LA AGROFORESTERÍA EN LA AGENDA POLÍTICA (en línea). s.l., s.e. Disponible en www.fao.org/publications.
- Augusto Rolando Manrique Ruiz. (2017). Desarrollo de un modelo de estimación de dosis de zinc en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Universidad de Chile. Disponible en: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151499/Desarrollo-de-un-modelo-de-estimacio%CC%81n-de-dosis-de-zinc-en-el-cultivo-de-mai%CC%81z-\(Zea-mays-L\).pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151499/Desarrollo-de-un-modelo-de-estimacio%CC%81n-de-dosis-de-zinc-en-el-cultivo-de-mai%CC%81z-(Zea-mays-L).pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Barraco, M., Álvarez, C., Girón, P., Miranda, W., Rampo, M. y Martín, H. (2018). Impacto de 13 años de secuencias agrícolas continuas en algunas propiedades de suelo. *Revista Memoria técnica*. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/impacto_de_13_anos_de_secuencias_agricolas_continuas_en_algunas_propiedades_de_suelo.pdf
- Beer, J; Ibrahim, M; Somarriba, E; Barrance, A; Leakey, R. 2003. 26569_Espanol. .
- Brito, JR y Sarmiento, GE (2012). Propuesta para la actualización del mapa de suelos de Honduras como base para diagnóstico de uso de suelo y contenido de carbón orgánico .[https://bdigital.z.edu//flujo de bits/110/109/1/Yo.pdf](https://bdigital.z.edu//flujo%20de%20bits/110/109/1/Yo.pdf) .
- Brussaard, L., et al. (2007). "Biological processes in soil: Global significance." *Ecological Economics*, 64(2), 292-302.
- C. Ordoñez, J; Hellin, J. (2017). El Sistema “Quesungual”: Agroforestería y manejo de suelos para la producción de maíz y frijol en laderas (en línea). Nairobi, s.e. DOI: <https://doi.org/10.5716/WP18007.PDF>.
- Cadena-Iñiguez, P; Camas-Gómez, R; López-Báez, W; López-Gómez, H del C; González-Cifuentes, JH; Cadena-Iñiguez, P; Camas-Gómez, R; López-Báez, W; López-Gómez, H del C; González-Cifuentes, JH. 2018. El MIAF, una alternativa

viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas (en línea). *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 9(7):1351-1361. DOI: <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V9I7.1670>.

Canales Ramírez, R. A., & Carrillo Hernández, R. A. (2018). Efecto de tres coberturas vegetales (viva, muerta, semicompostada) sobre las condiciones físicas, biológicas del suelo y manejo de malezas en el cultivo de.... Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León.

Canto, AR; González Moctezuma, P; Flores Torres, J; Nava Montero, R; Antonio, L; Aguilar, D; Ramón Pérez Pérez, J; Thüerbeck, N; Antonio González Iturbe, J. (2016). Desarrollo de Capacidades (en línea). s.l., s.e. Disponible en www.alianza-mredd.org.

Carrasco, C. (2020). Agricultura Regenerativa: La Fertilidad del Suelo y El Manejo de Cultivos. s.l., s.e.

Castellanos, A. (2017). CAMPUS PUEBLA. s.l., s.e.

Contreras, S. (s. f.). Milpa, Biodiversidad y Diversidad Cultural. s.l., s.e.

Cotler, H., Martínez, M. y Etchevers, J. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana* , 34(1), 125-138. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57344471009>

Cotler, H; María, Á; Cuevas Fernández, L; Luisa, M; Fernández, C. (2017). Estrategias de conservación de suelos en agroecosistemas de México. s.l., s.e.

Dionicio, R; Fragoso, C; Turrent, A; Ocampo, J; Ronald, C; Hernandez, R. 2008. Leisa - Mejoramiento del suelo en la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) (en línea, sitio web). Consultado 4 nov. 2023. Disponible en <https://leisa-al.org/web/index.php/volumen-24-numero-2/1874-mejoramiento-del-suelo-en-la-milpa-intercalada-con-arboles-frutales-miaf>.

Espinoza-Pérez, J., Cortina-Villar, S., & González, M. (2024). Edible plants as a complement to the diet of peasant farmers: A case study of the Totonacapan region of Puebla, Mexico. *Frontiers in Sustainable Food Systems*.

- Esquivel-Fariña, A., & González-Segnana, L. R. (2024). An annotated list of plant viruses described in Paraguay (1920–2023). *Biota Neotropica*.
- FAO. 2021. Libro Blanco/Wiphala sobre sistemas alimentarios de los pueblos indígenas. s.l., FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4932es>.
- Flores, YE, Romero, AJ, Torres, AM, Briceño, FA y García, AJ (2021). Efecto de abonos biológicos y fertilizantes químicos en el cultivo de maíz, FLASA Cojedes Venezuela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* , 6(1), 21-27. Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/1079>
- García Girón, J. 2020. Distribución espacial de la humedad del suelo y su relación con la cobertura vegetal en América Central, discrepancias dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano. [Tesis de grado]. Disponible en: file:///C:/Users/angel/Downloads/TFIA_Jorge_Daniel_Garcia.pdf.
- García, J., Rodríguez, P., & Velasco, L. (2019). Gestión de recursos orgánicos en sistemas agrícolas de montaña. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(3), 145-159.
- Garduño, R; Mejía, H; Turrent, A; Cortés, J; Muñoz, E. (2021). INNOVACIÓN AGRÍCOLA (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://www.cgiar.org/innovations/irrigation-for-smallholder-farmers/>.
- González, J., Pérez, F., y Rivas, M. (2020). Impacto de la fertilización en la disponibilidad de macronutrientes en sistemas agrícolas sostenibles. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 157-169. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00353-9>.
- González, RA, Álvarez, EY, & Castañeda, DA (2018). Evaluación de la calidad química del suelo en agroecosistemas cacaoteros de la subregión del Nordeste y Urabá Antioqueño. *Revista colombiana de investigaciones agroindustriales* , 5(1), 41-52. <https://doi.org/10.23850/24220582.730>
- Hernández Castellanos, M. (2015). Importancia de la medición de la cobertura vegetal en el manejo de pastizales. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

- Hernández Escobar, M. R. (2022). Estudio edafológico en el sistema MIAF: Disponibilidad de nutrientes en el suelo. Colegio de Postgraduados, México. Disponible en: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/5009/Hernandez_Escobar_MR_MC_Edafologia_2022.pdf?sequence=1
- Hernández, S., & Morales, G. (2016). Sistemas agroforestales y conservación del suelo. *Agroforestería en las Américas*, 24(3), 67-82.
- JICA; JAFTA. (2010). Manual Técnico de Agroforestería. s.l., s.e.
- Jiménez, J., González, M., y Sánchez, R. (2018). Dinámica de la materia orgánica en suelos de bosques y áreas agrícolas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 98-112.
- Lal, R. (2009). La degradación del suelo como causa de la disminución de la retención de agua y del rendimiento de los cultivos. *Avances en Agronomía*, [https://doi.org/10/S-2113\(09\)01001-5](https://doi.org/10/S-2113(09)01001-5).
- Lavelle, P., et al. (2006). "Soil invertebrates and ecosystem services." *European Journal of Soil Biology*, 42, S3-S15.
- López-Bernal, F., García, J., y Vargas, M. (2019). Manejo de fertilización en sistemas agroforestales: Impacto en la disponibilidad de nutrientes del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 552-567. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/709>
- López-Pérez, A., Hernández-Morcillo, M., y Martínez-Torres, J. (2020). Impacto de sistemas agroforestales en la calidad del suelo. *Revista de Ecología y Agricultura Sostenible*, 15(2), 123-135.
- Lozada, M; Ponce, A. 2023. La milpa | Biodiversidad Mexicana (en línea, sitio web). Consultado 2 nov. 2023. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/sistemas-productivos/milpa>.
- Lozano Ramírez, A. Y. 2024. Nutrición integral en cultivo de limón sutil *Citrus aurantifolia* en la parroquia Colonche-comuna Manantial de Guangala-Santa Elena. [Archivo PDF]. Disponible en:

<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10897/1/UPSE-TIA-2024-0006.pdf>

- Mairata, A., Labarga, D., Puellas, M., Rivacoba, L., & Portu, J. (2024). Organic Mulching Versus Soil Conventional Practices in Vineyards: A Comprehensive Study on Plant Physiology, Agronomic, and Grape Quality Effects. *Agronomy*. Disponible en MDPI.
- Manikandan, A., & Subramanian, K. (2021). Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: A mini-review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*.
- Mao, N; Sanchez, C; Hagiwara, T. 2000. *Manual de Agroforesteria*. .
- Martínez, R., Fernández, J., & Castro, L. (2018). Eficacia de los biofertilizantes en la mejora de la fertilidad del suelo. *Agroecología y Desarrollo Sostenible*, 5(1), 35-47.
- Martínez-López, A; Cruz-León, A; Sangerman-Jarquín, DMA; Cárdenas, SD; Cervantes Herrera, J; Ramírez-Valverde, B; Martínez-López, A; Cruz-León, A; Sangerman-Jarquín, DMA; Cárdenas, SD; Cervantes Herrera, J; Ramírez-Valverde, B. 2019. El estudio de los saberes agrícolas como alternativa para el desarrollo de las comunidades cafetaleras (en línea). *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 10(7):1615-1626. DOI: <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V10I7.2113>.
- Micro Gutiérrez, R., Pérez, F., y Torres, J. (2021). Conservación de micronutrientes en suelos: Comparación entre áreas naturales y sistemas agrícolas sostenibles. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 2187-2200. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00453-9>.
- Montagnini, F., & Somarriba, E. (2015). ***Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales***. Serie Técnica. Informe Técnico N.º 390. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Murillo, RA, & León, A. (2018). Producción y rentabilidad de plantas aromáticas en sistemas agroforestales diversificados en Costa Rica . *Revista de Agricultura*

- Sostenible, 12(3), 205-218. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/> .
- Orchardson, E. (2020, 4 de diciembre). El nitrógeno en la agricultura. CIMMYT . Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-nitrogeno-en-la-agricultura/>
- Ordoñez, J. (2021). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO. s.l., s.e.
- Orellana, R., Orellana, EC, & Méndez, R. (2020). Calidad del agroecosistema de producción de cacao (Theobroma cacao L.) en la finca Los Lirios, municipio Sucre, estado Portuguesa, Venezuela. Ciencia y Tecnología Agropecuaria , 5(1), 3-8. Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/786>
- Pérez Castro, L. M. (2010). Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio de especies vegetales establecidas en Mina Santa Cruz, Sur de Bolívar-Colombia. Universidad de Sucre.
- Pérez Jiménez, G. (2021). Producción y calidad de tomate con dos sistemas de poda bajo agricultura protegida. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Pérez, A., & González, F. (2017). Aplicación del diseño Keyline en la agricultura sostenible. Revista de Ingeniería Agrícola, 10(4), 200-215.
- Pérez, E., Cortina Villar, H. S., Rivera, P., & Flores, M. (2024). Edible plants as a complement to the diet of peasant farmers: A case study of the Totonacapan Region of Puebla, Mexico. SIDALC.
- Pillado, K. (2022). Estudios Sociales. s.l., s.e.
- Quintero, P. y Benavides, D. 2016. Fenología en naranjas de la zona central de Venezuela. Disponible en: <http://sbagro.org/files/biblioteca/948.pdf>.
- Ramírez Valverde, B; Ortiz-Jiménez, B; Ramírez-Cuevas, C. 2023. aprendizaje, capital social y redes sociales, en productores de la mixteca alta de Oaxaca. doi: <https://doi.org/10.22231/asyd>.

- Ramírez, M., & López, C. (2020). Impacto del cambio climático en la erosión del suelo en zonas montañosas. *Estudios de Ciencias Ambientales*, 8(2), 89-104.
- Raúl, H; Hernández, P; Beatriz, L; Esteva, R. (2021). Equipo colaborador de la Dirección General para el Bienestar y la Cohesión Social. s.l., s.e.
- Rojas Meza, J. 2019. Milpa intercalada con árboles frutales para la resiliencia al cambio climático, la sustentabilidad ambiental y la seguridad alimentaria en Nicaragua. *La Calera* 19(32):48-54. DOI: <https://doi.org/10.5377/CALERA.V19I32.8440>.
- Roncallo, B., Murillo, J., Bonilla, R. y Barros, J. (2012). Evolución de las propiedades del suelo en un arreglo agrosilvopastoril basado en Ceiba roja (*Pachira quinata*). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* , 13(2), 167-178. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624586>
- Rosales Mendez, Mauricio. 1999. Agroforestería para la producción animal en América Latina : memorias de una conferencia electrónica realizada de abril a septiembre de 1998. s.l., Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 515 p.
- Rosset, P; Altieri, M. (2018). AGROECOLOGÍA. s.l., s.e.
- Sanial, E. 2020. La-agroforesteria-en-el-sector-del-cacao-la-necesidad-de-enfoques-de-paisaje-colaborativos-ambiciosos. .
- Secretaría de Educación. 2017. Manual de Conservación de Suelos. Secretaría de Educación, Gobierno de Honduras. Disponible en: https://www.se.gob.hn/media/files/media/Modulo_3_Manual_Conseervacion_de_Suelos..pdf.
- Sergieieva, K. 2016. Tecnología Agrícola: Innovación En El Cultivo De Cosechas (en línea, sitio web). Consultado 6 nov. 2023. Disponible en <https://eos.com/es/blog/tecnologias-en-la-agricultura/>.
- SIC. 2020. El sistema Milpa Intercalado con Árboles Frutales (MIAF) incrementa ingresos a... (en línea, sitio web). Consultado 6 nov. 2023. Disponible en <https://prod.senasica.gob.mx/ALERTAS/inicio/pages/single.php?noticia=5509#>.

- Simonit, S; Martínez, A; Contreras, G; Colín, A; Pacheco, R; Solano, B; Ortíz, M. 2020. 2020-043-Es. .
- Tabare, A. (2020). Campus puebla diversidad edáfica y relaciones productivas de la milpa intercalada con árboles frutales en la región de huejotzingo, puebla tabaré tonalli aquimín duché garcía presentada como requisito parcial. s.l., s.e.
- Turrent Fernández, A; Cortés Flores, JI; Espinosa Calderón, A; Hernández Romero, E; Camas Gómez, R; Pablo Torres Zambrano, J; Zambada Martínez, A. (2017). Núm.5 30 de junio-13 de agosto. 8. s.l., s.e.
- Turrent Fernández, E. et al. (2017). Milpa intercalada con árboles frutales (MIAF): Una estrategia de agricultura sostenible. *Revista Mexicana de Agroecología*, 19(2), 55-70.
- Turrent Fernández, M; Flores, C; Calderón, E; Romero, H; Gómez, C; Zambrano, T; Pablo, J; Martínez, Z. 2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México?* (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(5):1169-1185. Consultado 6 nov. 2023. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263152411014>.
- UNESCO. 2010. La cocina tradicional mexicana: Una cultura comunitaria, ancestral y viva y el paradigma de Michoacán - patrimonio inmaterial - Sector de Cultura - UNESCO (en línea, sitio web). Consultado 4 nov. 2023. Disponible en <https://ich.unesco.org/es/RL/la-cocina-tradicional-mexicana-una-cultura-comunitaria-ancestral-y-viva-y-el-paradigma-de-michoacan-00400>.
- Universidad de Chile. 2012. Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Ministerio de Agricultura de España. 2020. Impacto de la agricultura en los sistemas fluviales. Ministerio de Agricultura. Disponible en:

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_ays%2Fa078_06.pdf.

USAID. (2017). Compendio de Prácticas Ancestrales del Sistema Milpa (en línea). s.l., s.e. Disponible en www.nexoslocales.com.

Vávra, R; Stryhalová, G; Kaplan, J. 2022. Cómo aplicar hongos micorrízicos en fruticultura (BIOFRUITNET Practice Abstract) - Organic Farm Knowledge (en línea, sitio web). Consultado 4 nov. 2023. Disponible en <https://organic-farmknowledge.org/es/tool-1/45004>.

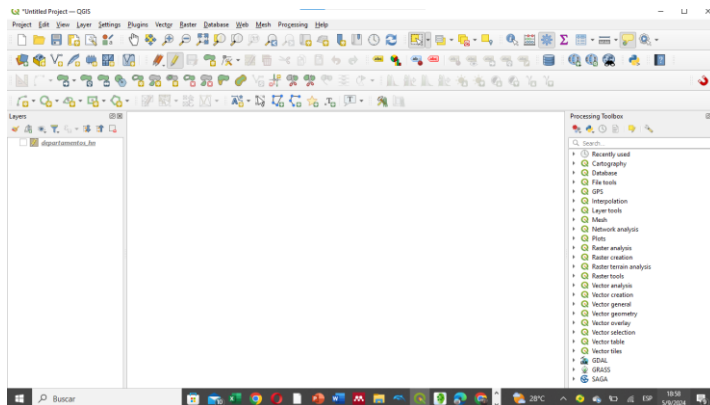
Vega, J., y Martínez, A. (2019). Impacto de la cobertura del suelo en la disponibilidad de micronutrientes en sistemas agroecológicos. *Ciencia y Agricultura*, 25(2), 102-114. Recuperado de <https://cienciayagricultura.org/2019/vol25-2>.

Yagel, Z. 2020. PRODUCCIÓN CIRCULAR – Ibercocinas (en línea, sitio web). Consultado 4 nov. 2023. Disponible en <https://www.ibercocinas.org/mesa/produccion-circular/>.

Zamora, D. S., Rodríguez, J. M., & López, L. A. (2019). Integrated soil and water management practices to improve agricultural resilience in Latin American agroforestry systems. *Agricultural Water Management*, 215, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.015>

X. ANEXOS

Anexo 1. Programa Qgis para realizar todos los mapas de la parcela.



Anexo 2. Observaciones de fuertes sequias



Anexo 3. Guía estructurada con temas priorizados para recopilar información

- **Introducción:** se iniciará con una presentación que se acompañará del porque estoy en el municipio y la presentación de la metodología
- **Información general:** determinar el número de personas de la familia y cuantas trabajan en la finca, determinar también el tamaño del terreno, asentamientos a la zona y sus fuentes de ingreso.
- **Determinación de sistemas** de producción: Cuales son los componentes del sistema, cuáles son sus caracterizaciones de acuerdo a sus principales

producciones, problemas en la producción, ingresos y su situación actual a comparación a unos años atrás.

- **Comentarios adicionales**

Conclusiones: que se va a realizar en el campo y agradecimientos

Anexo 4. Procedimiento de estaco e implementación de líneas claves.



Anexo 5. Semilla de maíz y frijol local para la integración en el sistema



Anexo 6. Procedimiento del ahoyado de los frutales.



Anexo 7. Proceso de siembra y trasplante



Anexo 7. Preparación de insumos orgánicos



Anexo 9. Aplicación de bioles



Anexo 8. Tablas para los índices de cobertura del suelo en el MIAF.



Anexo 9. Tomas de los solutos de las hojas del limón (*Citrus limon*)



Anexo 10. Procedimiento de las pruebas en el laboratorio de la universidad nacional de agricultura.



Anexo 11. Tablas para los índices de cobertura del suelo en el MIAF.

Especies	Muestras de cobertura					Promedio
	1	2	3	4	5	
Monte largo	16	2	3.5	8.3	23	13,6666667
Parece frijol	3	10	5	11	7	7,2
De cuatro espadas	9	16	5	18	10	11,6
Sombrilla	12	19	8	6	17	12,4
Cuatro puntiagudas						
Monte delgado						
Frijol						
Dos hojas redondas						
Huerta						
De tres hojas						
Arbolito de dos						
Maiz						
Frijol						
Cuatro puntas delgada						
Hoja de cierra						
Hoja corrugado						
Hierbas de cuatro						
Hoja de corona						
espina						

Especies	Muestras de cobertura				Promedio
	1	2	3	4	
Monte largo	21	15	33	42	27,75
Parece frijol	0.5	1	2	3	2
De cuatro espadas	1,2	2,8		3.5	2
Sombrilla	0,5				0,5
Cuatro puntiagudas	2,4			2	2,2
Monte delgado	2,5	6	7	12	6,875
Frijol	1,9	1	2	2.5	1,63333333
Dos hojas redondas	1				1
Huerta			2	1	1,5
De tres hojas		1	3	1.5	2
Arbolito de dos		1		1.5	1
Maiz		1	2	2.5	1,5
Cuatro puntas delgada		2	1		1,5
Hoja de cierra		0,5			0,5
Hoja corrugado		0,7			0,7
Hierbas de cuatro		2			2
Hoja de corona			3	2	2,5
espina			1		1
Quiebra pierda		2	2	3.5	2

Anexo 12. Triturado de materia orgánica (*Musa paradisiaca*)



Anexo 14. Conteo de la microfauna



Anexo 15. Resultado de los análisis de suelo realizados en laboratorio de la universidad nacional de agricultura de un área natural

		LABORATORIO DE SUELOS AGRICOLAS PhD ELIO DURÓN ANDINO		N° laboratorio 106/2024	
		INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS DE SUELOS		N° Solicitud xxx	Fecha de entrega 11/11/2024
Información general					
Solicitante:	Jonathan Cuello		Identificación de la muestra		Area Natural
Dirección del solicitante	Lauterique, La Paz		Procedencia de la muestra		Lauterique, La Paz
Entregada por	Jonathan Cuello		Cultivo		Variado
Fecha de recepción de la muestra	20 Mayo		Edad del cultivo		N/A
Condiciones de la muestra	Recipiente adecuado		Densidad de siembra		N/A
Análisis Realizados					
Analito	Resultado	Unidad	Resultado	Unidad	
pH	6.00		Sodio		ppm
Carbono Orgánico	1.70	%	Hierro	351.1	ppm
Materia Orgánica	2.94	%	Manganeso	172.0	ppm
Nitrógeno	0.15	%	Cobre	6.78	ppm
Fósforo	72.24	ppm	Zinc	1.10	ppm
Potasio	134.9	cmol/kg	Boro	--	ppm
Calcio	4.876	cmol/kg	Azufre	--	ppm
Magnesio	861.6	cmol/kg	Aluminio	--	cmol/kg
Recomendación					
Métodos: K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn: Extracción con Mehlich 3, determinados por EAA / P: Extracción con Mehlich 3, determinado por colorimetría / pH: en agua 1:2.5 / Materia Orgánica: Walkley & Black / % N: 5% de M O / B y S: Extracción con fosfato de Calcio, determinados por colorimetría / Al: Extracción con KCl 1N, determinado por titulación / textura método Bouyoucos					
Carlos Irias, MSc Jefe del Laboratorio					

Anexo 16. Resultado de los análisis de suelo realizados en laboratorio de la universidad nacional de agricultura del sistema MIAF.

		LABORATORIO DE SUELOS AGRICOLAS PhD ELIO DURON ANDINO		N° laboratorio 105/2024	
		INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS DE SUELOS		N° Solicitud xxx	Fecha de entrega 11/11/2024
Información general					
Solicitante:	Jonathan Cuello	Identificación de la muestra	Sistema MIAF		
Dirección del solicitante	Lauterique, La Paz	Procedencia de la muestra	Lauterique, La Paz		
Entregada por	Jonathan Cuello	Cultivo	Variado		
Fecha de recepción de la muestra	20 Mayo	Edad del cultivo	N/A		
Condiciones de la muestra	Recipiente adecuado	Densidad de siembra	N/A		
Análisis Realizados					
Analito	Resultado	Unidad	Analito	Resultado	Unidad
pH	6.10		Sodio		ppm
Carbono Orgánico	1.29	%	Hierro	454.7	ppm
Materia Orgánica	2.22	%	Manganeso	177.5	ppm
Nitrógeno	0.11	%	Cobre	6.09	ppm
Fosforo	151.4	ppm	Zinc	1.89	ppm
Potasio	149.9	cmol/kg	Boro	--	ppm
Calcio	4.115	cmol/kg	Azufre	--	ppm
Magnesio	568.6	cmol/kg	Aluminio	--	cmol/kg
Recomendación					
Métodos: K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn: Extracción con Mehlich 3, determinados por EAA / P: Extracción con Mehlich 3, determinado por colorimetría / pH: en agua 1:2.5 / Materia Orgánica: Walkley & Black / % N: 5% de M O / B y S: Extracción con fosfato de Calcio, determinados por colorimetría / Al: Extracción con KCl 1N, determinado por titulación / textura método Bouyoucos					
Carlos Irias, MSc Jefe del Laboratorio					