

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

MENCIÓN: CULTIVOS TROPICALES



**DINÁMICA DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LA
AGRICULTURA TRADICIONAL Y DE CONSERVACIÓN, CON DOS FUENTES
ENCALANTES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO**

Tesis

Para optar el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS,

MENCIÓN: CULTIVOS TROPICALES

PRESENTADO POR:

JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES

Asesor:

JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

Tingo María – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO – FACULTAD DE AGRONOMÍA



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Nro. 005 – 2025 – UP – FA - UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 10:00 a.m., del miércoles 10 de diciembre de 2025, reunidos en la sala de audiovisuales de la Facultad de Agronomía, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:


“DINÁMICA DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LA AGRICULTURA TRADICIONAL Y DE CONSERVACIÓN, CON DOS FUENTES ENCALANTES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO”

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias Agrícolas, mención: Cultivos Tropicales, Ing. **JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES**.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**.

Acto seguido, a horas 11:10 a.m. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.


.....
M. Sc. **JORGE LUIS ADRIAZOLA DEL AGUILA**
Presidente del Jurado


.....
Dr. **JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO**
Miembro del Jurado


.....
M.Sc. **LLERME NAVARRO VASQUEZ**
Miembro del Jurado


.....
Dr. **JOSE WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO**
Asesor





UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 003 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Maestría en Ciencias en Agroecología Mención: Cultivos Tropicales

Tipo de documento:

| | | | |
|-------|---|------------------------------------|--|
| Tesis | X | Trabajo de Suficiencia Profesional | |
|-------|---|------------------------------------|--|

| TÍTULO | AUTOR | PORCENTAJE | |
|--|------------------------------------|--------------|--|
| | | SIMILITUD | CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL |
| DINÁMICA DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LA AGRICULTURA TRADICIONAL Y DE CONSERVACIÓN, CON DOS FUENTES ENCALANTES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO | JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES | 03 % Tres | Menor a 20 % |

Tingo María, 12 de enero de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

MENCIÓN: CULTIVOS TROPICALES



DINÁMICA DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LA AGRICULTURA TRADICIONAL Y DE CONSERVACIÓN, CON DOS FUENTES ENCALANTES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO

| | |
|-----------------------------------|--|
| Autor | : Jimmy Alcides Ocaña Reyes |
| Asesor (es) | : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano |
| Área de Investigación | : Suelos y fertilizantes |
| Línea (s) de Investigación | : Fertilidad, clasificación, Biología, recuperación y manejo de suelos |
| Eje temático | : Uso de encalantes en la producción de Maní Forrajero |
| Lugar de ejecución | : Campoverde km 44, Ucayali |
| Duración del trabajo | : Octubre del 2022 a marzo del 2023 |
| Financiamiento | : S/. 7 425,00 |

Tingo María – Perú 2025



FORMATO PARA REGISTRAR EL PROYECTO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO

| | |
|-------------------------------|---|
| Universidad | : Universidad Nacional Agraria de la selva |
| Escuela de Posgrado | : EPG-UNAS |
| Posgrado | : Maestría en Ciencias Agrícolas |
| Mención | : Cultivos Tropicales |
| Título de la Tesis | : Dinámica de algunas propiedades del suelo en la agricultura tradicional y de conservación, con dos fuentes encalantes en la producción de maíz forrajero |
| Objetivo General | : Determinar el efecto de los sistemas de labranza y encalado sobre algunas propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo, variables biométricas y contenido de nutrientes en el forraje de la variedad de maíz INIA 616 |
| Autor de la Tesis | : Jimmy Alcides Ocaña Reyes |
| DNI | :10790104 |
| Correo electrónico | : jimmy.ocana@unas.edu.pe |
| Asesor | : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano |
| Área de Investigación | : Suelos y Fertilizantes |
| Grupo de Investigación | : Recuperación y manejo de suelos degradados y contaminados |
| Línea de investigación | : Fertilidad, clasificación, biología y manejo de suelos |
| Lugar de Ejecución | : Campoverde km 44, Ucayali |
| Fecha de inicio | : octubre del 2022 |
| Fecha de finalización | : marzo del 2023 |
| Presupuesto | : S/. 7 425 |
| Financiamiento | : Propio (X) FIF () Externo () |

Según: **Resolución:** N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

DEDICATORIA

A Dios:

Él que en todo momento guía mi camino.

A mis padres:

Nélida y Ciro

A mi esposa:

Maritza por impulsar mi estudio de maestría.

A mi hija:

Priscila

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva - UNAS y a todo el personal que la conforman, por contribuir y ser parte en mi formación profesional.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solorzano, asesor de la presente tesis, por su apoyo en el proyecto, ejecución, contribución científico y culminación.
- A Dr. Hugo Huamaní Yupanqui por su apoyo y contribución en la tesis y artículo científico.
- A M. Sc. Jorge Luis Adriazola del Águila en condición de presidente, por su apoyo en la ejecución, culminación y revisión académica del trabajo de investigación.
- A los miembros del jurado de tesis por sus aportes y contribuciones en la revisión académica científica al presente trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|---|---------------|
| RESUMEN | |
| ABSTRACT | |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. Labranza del suelo tradicional hacia la agricultura de conservación | 4 |
| 2.2. Impacto de la labranza de la agricultura tradicional y de conservación en las propiedades del suelo | 4 |
| 2.2.1. Efecto biológico..... | 4 |
| 2.2.2. Efectos Físicos..... | 6 |
| 2.2.3. Efectos químicos | 7 |
| 2.3. Acidificación del suelo y encalado | 9 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 10 |
| 3.1. Ubicación y características del campo experimental | 10 |
| 3.2. Diseño experimental y manejo de campo | 10 |
| 3.3. Datos colectados | 12 |
| 3.3.1. Variables evaluadas | 12 |
| 3.3.2. Medición de variables | 13 |
| 3.4. Análisis estadístico | 16 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 17 |
| 4.1. Variables biológicas del suelo | 17 |
| 4.1.1. Emisión de CO ₂ del suelo | 17 |
| 4.1.2. Población de lombrices | 19 |
| 4.2. Variables físicas del suelo | 21 |
| 4.2.1. Humedad gravimétrica (H ^o) | 21 |
| 4.2.2. Densidad aparente (Da)..... | 22 |
| 4.2.3. Conductividad hidráulica (Ks) | 24 |
| 4.3. Variables químicas del suelo | 25 |
| 4.4. Variables biométricas y foliares del maíz forrajero..... | 28 |
| 4.4.1. Altura, índice de área foliar, forraje verde y seco | 28 |
| 4.4.2. N, P, K, Ca y Mg foliar | 30 |
| V. CONCLUSIONES | 32 |

| | |
|-------------------------------|----|
| VI. PROPUESTAS A FUTURO | 33 |
| VII. REFERENCIAS | 34 |
| ANEXOS | 44 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Página |
|--|--------|
| 1. Variables evaluadas de las propiedades biológicas, físicas, químicas del suelo, biométricas y contenido foliar del maíz forrajero INIA 616. | 13 |
| 2. Promedios \pm error estándar de la dinámica de los cationes del suelo bajo sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza con el encalado..... | 26 |
| 3. Promedios \pm error estándar de las relaciones catiónicas y pH bajo sistemas de labranza, encalado y sistemas de labranza x encalado. | 27 |
| 4. Promedios \pm error estándar de la biometría y rendimiento del maíz forrajero con diferentes sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza con el encalado. | 29 |
| 5. Promedios \pm error estándar de los nutrientes foliares del forraje bajo sistemas de labranza, encalado y sistemas de labranza con el encalado..... | 30 |
| 6. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 3° día..... | 47 |
| 7. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 6° día..... | 47 |
| 8. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 10° día..... | 47 |
| 9. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 14° día..... | 48 |
| 10. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 17° día..... | 48 |
| 11. Análisis de varianza de la emisión de CO ₂ del suelo en el 21° día..... | 48 |
| 12. Análisis de varianza de la población de lombrices | 49 |
| 13. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo a una profundidad de 0 – 10 cm.. | 49 |
| 14. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo a una profundidad de 10 - 20 cm | 49 |
| 15. Análisis de varianza de la humedad del suelo (0 – 10 cm), a los 40 dds | 50 |
| 16. Análisis de varianza de la humedad del suelo (10 - 20 cm), a los 40 dds | 50 |
| 17. Análisis de varianza de la humedad del suelo (0 – 10 cm), a los 83 dds | 50 |
| 18. Análisis de varianza de la humedad del suelo (10 – 20 cm), a los 83 dds | 51 |
| 19. Análisis de varianza de la conductividad hidráulica | 51 |
| 20. Análisis de varianza del contenido de L Al en el suelo | 51 |
| 21. Análisis de varianza del contenido de Ca en el suelo | 52 |
| 22. Análisis de varianza del contenido de Mg en el suelo | 52 |
| 23. Análisis de varianza del contenido de K en el suelo | 52 |
| 24. Análisis de varianza de la relación Ca/Mg en el suelo..... | 53 |
| 25. Análisis de varianza de la relación Mg/K en el suelo | 53 |
| 26. Análisis de varianza de la relación Ca/K en el suelo | 53 |

| | |
|--|----|
| 27. Análisis de varianza de la relación (Ca + Mg + K)/Al en el suelo | 54 |
| 28. Análisis de varianza de la altura de planta del maíz forrajero | 54 |
| 29. Análisis de varianza del índice del área foliar del maíz forrajero..... | 54 |
| 30. Análisis de varianza del rendimiento de forraje verde | 55 |
| 31. Análisis de varianza del rendimiento de materia secas del forraje verde..... | 55 |
| 32. Análisis de varianza del contenido foliar de N..... | 55 |
| 33. Análisis de varianza del contenido foliar de P..... | 56 |
| 34. Análisis de varianza del contenido de Ca foliar | 56 |
| 35. Análisis de varianza del contenido de Mg foliar | 56 |
| 36. Análisis de varianza del contenido de K foliar | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|--------|
| 1. Croquis del diseño experimental en parcelas divididas con cuatro bloques de dos sistemas de labranza con aplicación de encalantes. | 11 |
| 2. Promedio \pm error estándar de la emisión de CO ₂ del suelo (a), temperatura (b) y humedad (c) aaaa del suelo para los sistemas de labranza por 21 días. | 18 |
| 3. Matriz de coeficientes de la correlación de pearson de la emisión de CO ₂ del suelo con la temperatura (a) y la humedad (b) del suelo..... | 19 |
| 4. Medias aritméticas y errores estándar del número de lombrices a 0-10 cm de profundidad bajo la interacción del sistema de labranza con encalado..... | 20 |
| 5. Medias aritméticas y errores estándar de la humedad gravimétrica del suelo en dos momentos de muestreo, a dos profundidades del suelo. | 22 |
| 6. Medias aritméticas y errores estándar de densidad aparente bajo los sistemas de labranza a dos profundidades del suelo. | 23 |
| 7. Medias aritméticas y errores estándar de la conductividad hidráulica bajo la interacción entre los sistemas de labranza y encalado..... | 25 |
| 8. Acondicionamiento de la parcela experimental. (a) corte del <i>desmodium</i> sp. (b) aplicación de encalantes. | 45 |
| 9. Metodología de captura de CO ₂ del suelo. (a) disposición de trampas de CO ₂ en las unidades experimentales. (b) recojo y reposición de naoh en campo. (c) titulación ácido base..... | 45 |
| 10. Proceso del cultivo. (a) siembra de maíz. (b) fumigación contra gusanos de tierra. (c) periodo vegetativo del maíz..... | 46 |
| 11. Determinación de algunas variables. (a) conductividad hidráulica. (b) humedad del suelo y densidad aparente. (c) rendimiento del forraje verde | 46 |

RESUMEN

Las prácticas de la labranza de la agricultura de conservación y tradicional, y la aplicación de encalantes influyeron en las propiedades del suelo y en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, dicha información es variable y escasa. El objetivo fue comparar las propiedades del suelo y la producción de forraje con los dos sistemas de labranza con adición de materiales encalantes (testigo, dolomita, cal), los cuales formaron seis tratamientos. La labranza en la agricultura tradicional en los tres primeros días emitió bruscamente 68 % más $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ que el suelo de la agricultura de conservación; la conductividad hidráulica y la densidad aparente de la agricultura tradicional fueron más adecuadas que aquellas de la agricultura de conservación. Esta última mostró 233 lombrices/ m^2 más que en la agricultura tradicional. El forraje verde en la agricultura tradicional rindió 6,45 t/ha más que la agricultura de conservación, con mayor concentración foliar de P, Ca y Mg, pero la agricultura de conservación mostró mayor N y K foliar. El encalado incrementó la concentración de cationes en el suelo (excepto K), resaltando la cal sobre la dolomita con un 52 % de Al menos en el suelo, y con 4.85 t/ha adicionales de maíz forrajero comparado con el control. La emisión de CO_2 del suelo fue mucho más baja en la agricultura de conservación que en la agricultura tradicional, con un rendimiento ligeramente menor de forraje que la agricultura tradicional y mejoró otras propiedades del suelo, significando menor costo de preparación de terreno y ahorro de tiempo que en la agricultura tradicional. La cal mejoró el suelo ácido más rápido que la dolomita, generando mayor rendimiento de forraje.

Palabras claves: Emisión de CO_2 del suelo; población de lombrices; pH, suelo ácido; relaciones catiónicas

ABSTRACT

The conservation and traditional practices for agricultural farming and the application of whitewashes influenced the soil properties and the crop yield. However, said information was variable and scarce. The objective was to compare the soil properties and the production of forage for the two farming systems, with the additions of whitewashing materials (control, dolomite and calcimine), which were put into six treatments. For the first three days, traditional agricultural farming sharply emitted 68% more $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ than the agricultural soil under conservation; the hydraulic conductivity and the apparent density for the traditional agriculture were more adequate than those of agricultural conservation. The latter had 233 worms/ m^2 more than traditional agriculture. The green forage from traditional agriculture yielded 6.45 t/h more than agricultural conservation, with a greater concentration of P, Ca and Mg in the leaves, but agricultural conservation proved to have a greater foliar N and K. The whitewash increased the concentration of cations in the soil (except K), highlighting the calcimine over the dolomite with 52% less Al in the soil, and with 4.85 t/h additional forage corn, compared with the control. The CO_2 emission from the soil was lower for agricultural conservation than in traditional agriculture, with a slightly lower yield of forage than traditional agriculture and other soil properties improved, signifying a lower cost for the preparation of the land and a savings of time [when compared with] traditional agriculture. The calcimine improved the acid in the soil more quickly than the dolomite, generating greater forage yield.

Keywords: CO_2 emission of the soil, worm population, pH, acid in the soil, cationic relationships

I. INTRODUCCIÓN

Las prácticas de la labranza y el suelo desnudo de la agricultura tradicional conllevan a la degradación del suelo (Blanco-Moure et al., 2012; Han et al., 2020; Petite et al., 2022). El mundo en los últimos 40 años perdió la tercera parte de tierras productivas debido a la erosión (FAO, 2012). En la selva amazónica peruana, la erosión del suelo es severa en más de 300 000 ha de cultivos (Achung, 1995), la cual aunada a las prácticas culturales tradicionales de productores migrantes de la sierra, al mal manejo del cultivo sembrado a favor de la pendiente con cultivos de escarda y al cultivo de coca, esta degradación es agravada (Celis-Tarazona et al., 2020; Marcelino et al., 2014). Además, la superficie con capacidad de uso mayor de suelos para la labranza es escasa, representando un 11,7 % en la región Ucayali (MIDAGRI, 2022), pero es realizada indiscriminadamente, incluso en suelos de protección.

Por otro lado, el 40 - 50 % de los suelos agrícolas del mundo son suelos ácidos (Rahman et al., 2018). En Ucayali, más del 87 % son suelos ácidos (GORU, 2014), los cuales se caracterizan por tener un pH menor o igual a 5,5 (Gazey et al., 2009) que disminuye la disponibilidad de macronutrientes y molibdeno, empieza la solubilización alta del Al y es tóxico para los cultivos (María et al., 2006; Rahman et al., 2018; Tiritan et al., 2016).

El suelo experimenta fracturas que rompen su estructura y se presenta una sobre oxidación de la materia orgánica desde el inicio de la labranza en la agricultura tradicional (Pisante et al., 2011). Así mismo, la escorrentía incrementa; la conductividad hidráulica, el contenido de agua disminuyen; y la densidad aparente aumenta (Sartori et al., 2022), conllevando a la erosión del suelo (Derpsch et al., 2010; Lal et al., 2007). Además, la labranza crea un ambiente adverso para la macrofauna del suelo, al tener inadecuada temperatura, humedad en el suelo, y su continua practica a través de los años menora la disponibilidad de carbono del suelo, afectando negativamente la actividad biológica del suelo (McInga et al., 2020; Muoni et al., 2019; Singh et al., 2020). En contraposición, la agricultura de conservación es caracterizada por no quemar residuos de cosecha, escasa perturbación del suelo para la siembra y el mantenimiento de coberturas orgánicas, cuyo objetivo es mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo (Alam et al., 2018; Cárceles Rodríguez et al., 2022; La Scala et al., 2006). Además, la agricultura de conservación es un método reconocido para atenuar la erosión del suelo (Derpsch et al., 2010; Lal et al., 2007; Petite et al., 2022) y emerge como una alternativa amigable con los recursos naturales, mostrando una conductividad hidráulica adecuada (Sartori et al., 2022; Thierfelder et al., 2010), menor densidad aparente

(Nyamangara et al., 2014), mayor humedad del suelo (Carbonell-Bojollo et al., 2019; Mloza-Banda et al., 2016), que en la agricultura tradicional (AT). La oxidación de la materia orgánica es excesiva en un suelo labrado, emitiendo mayor cantidad de CO₂ que un suelo sin labrar. La emisión del CO₂ en el suelo de la AT fue mayor que en la agricultura de conservación (AC) (Toufeeq et al., 2020) y a largo plazo podría disminuir el almacén de la materia orgánica y la fertilidad del suelo (Jayaraman et al., 2022; Mühlbachová et al., 2022).

Los suelos ácidos son caracterizados por un pH bajo aunado a un porcentaje de acidez de aluminio mayor a 25 %, los cuales conllevaron a una disminución significativa del rendimiento de maíz (Crusciol et al., 2019; Mutsamba et al., 2020; Nyamangara et al., 2014). Al aplicar cal y dolomita, los rendimientos de los cultivos podrían ser mayores cuando se aplica cal y son evaluados en corto tiempo, porque la cal tiene mayor solubilidad que la dolomita, pero al evaluar en un tiempo mayor, los rendimientos de los cultivos fueron similares (Nogaroli et al., 2020; Stevens et al., 2005; Tiritan et al., 2016).

La investigación sobre los sistemas de labranza de la agricultura tradicional y de conservación asociadas a prácticas de encalado en suelos ácidos son variables y escasas, y la instalación de un estudio de campo es el mejor camino para saber qué tipo de sistema de labranza, encalado y qué combinación de dichos factores mejora las propiedades del suelo y el rendimiento del maíz forrajero. Para dicho fin, este estudio enfocó la combinación de la agricultura de conservación con la aplicación de encalantes al suelo como una alternativa que podría atenuar la disminución de CO₂ del suelo por la labranza de la agricultura tradicional, mejorar otras propiedades del suelo y aumentar el rendimiento del maíz forrajero en un suelo ácido.

1.1. Objetivo general

Determinar el efecto de los sistemas de labranza y encalado sobre algunas propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo, variables biométricas y contenido de nutrientes en el forraje de la variedad de maíz INIA 616.

1.2. Objetivo específico

- a. Determinar y comparar el efecto de la agricultura de conservación y tradicional, cal y dolomita sobre la emisión de CO₂ del suelo y población de lombrices del suelo.
- b. Determinar y comparar el efecto de la agricultura de conservación y tradicional, cal y dolomita sobre la humedad gravimétrica, densidad aparente y conductividad hidráulica.

- c. Determinar y comparar el efecto de la agricultura de conservación y tradicional, cal y dolomita sobre el contenido de Ca, Mg, K, Al, relaciones catiónicas y pH del suelo.
- d. Determinar y comparar el efecto de la agricultura de conservación y tradicional, cal y dolomita sobre la altura de planta, área foliar, forraje verde y seco y contenido foliar de N, P, K, Ca, Mg en el forraje de la variedad de maíz INIA 616.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Labranza del suelo tradicional hacia la agricultura de conservación

La labranza del suelo ha sido una práctica agrícola común a lo largo de la historia, pero su impacto negativo en la salud del suelo ha sido objeto de creciente preocupación. La ruptura de la estructura del suelo, la pérdida de materia orgánica y la erosión son efectos adversos vinculados al laboreo intensivo (Lal et al., 2007). La transición de la agricultura tradicional hacia la agricultura de conservación surge como respuesta a desafíos críticos que enfrentaron las zonas agrícolas en el medio oeste de los Estados Unidos durante la década de 1930, marcada por eventos climáticos extremos, como la conocida "bola de polvo". Este impactante fenómeno instigó una profunda reflexión dentro de la comunidad científica y agrícola sobre las prácticas tradicionales. Inicialmente, el enfoque se orientó hacia la erosión del suelo causada por las técnicas de labranza. Fue en este contexto que surgió el concepto de "labranza de conservación", introduciendo la idea de una cobertura mínima del suelo con residuos de cultivos para contrarrestar la erosión a niveles sostenibles. La esencia de esta práctica reside en minimizar la perturbación del suelo, retener los residuos de cosecha y utilizar coberturas orgánicas sobre la superficie del suelo (Derpsch et al., 2010).

La agricultura de conservación, como se conoce, va más allá de abordar la erosión; su objetivo es mejorar las propiedades del suelo de manera holística y mitigar los efectos negativos en el medio ambiente, destacándose la importancia de esta estrategia, presentándola como una alternativa viable frente a las prácticas intensivas de labranza (Alam et al., 2018; Thierfelder et al., 2010). La adopción de la agricultura de conservación ha experimentado un aumento sustancial, impulsada por sus beneficios ambientales, económicos y sociales. Según las investigaciones de Kassam et al. (2022b), entre los años 2015 y 2018, el área de cultivo bajo la agricultura de conservación creció notablemente, desde los 180,4 millones a 205,4 millones de hectáreas, respectivamente. Este aumento se ha observado en diversas regiones, climas y situaciones económicas, resaltando la aceptación generalizada de la agricultura de conservación como un enfoque práctico y sostenible en la producción agrícola.

2.2. Impacto de la labranza de la agricultura tradicional y de conservación en las propiedades del suelo

2.2.1. Efecto biológico

La materia orgánica del suelo juega un papel importante en la mejora de la salud y la fertilidad del suelo. La labranza conduce al agotamiento de la materia orgánica del suelo en suelos agrícolas en comparación con los suelos bajo vegetación natural. La principal razón de esta pérdida es el aumento dramático de la tasa de descomposición de la materia

orgánica del suelo mediante oxidación. En los sistemas de labranza se remueve la biomasa vegetal de la superficie del suelo, lo que provoca que los organismos del suelo mueran de inanición. La labranza también destruye la estructura del suelo que sólo puede construirse mediante procesos biológicos del suelo. En consecuencia, la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados se debilitan con el tiempo debido a la labranza, lo que aumenta el riesgo de erosión del suelo y pérdida de la capa superior del suelo. Este proceso de pérdida conduce a una disminución en la infiltración de lluvia, la capacidad de retención de agua y el contenido de nutrientes, y conduce a una mayor compactación del suelo y pérdida de biodiversidad del suelo (Kassam et al., 2022b). La agricultura de conservación como estrategia en la gestión de tierras agrícolas puede mejorar la salud y la biología del suelo (Hobbs et al., 2008). La agricultura de conservación es un enfoque agroecológico de la producción agrícola basado en la aplicación de tres sistemas de CA interrelacionados que pueden aumentar tanto el secuestro de carbono del suelo como la productividad y reducir la necesidad de combustibles fósiles (Kassam et al., 2009).

La labranza con el tiempo puede inducir pérdidas del contenido de carbono orgánico del suelo en un 50 % o más debido al aumento de los procesos aeróbicos de la respiración microbiana (Birkás et al., 2004). Muchos estudios han investigado los efectos de los sistemas convencionales y de CA sobre la pérdida de carbono del suelo por la respiración del suelo (Knowles et al., 2003) y los resultados son muy variables de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas. Muchos autores han informado que las emisiones de CO₂ son mayores en la agricultura de labranza convencional en comparación con los sistemas de AC sin labranza (Bauer et al., 2006). En los sistemas de AC, la difusión del aire hacia el suelo y los poros llenos de aire se reduce en comparación con la agricultura de labranza convencional, lo que provoca una emisión de CO₂ baja o mínima (Ball et al., 1999). Pero, en los sistemas de labranza cero, la emisión de CO₂ del suelo puede aumentar debido al mayor contenido de agua en las capas superficiales del suelo que puede estimular la actividad biológica del suelo y la emisión de CO₂ (Bilandija et al., 2014).

Cabe destacar que la macrofauna del suelo, como la lombriz de tierra, ha sido catalogada como "ingenieras de ecosistemas". Esto se debe a su capacidad para generar y mantener la estructura del suelo mediante la apertura de macroporos continuos (Blanchart et al., 1999), la formación de macroagregados estables y la contribución a la formación de complejos organominerales (Six et al., 2004).

La actividad de las lombrices de tierra es esencial para la salud del suelo, puede ser estimulada mediante la reducción de la perturbación del suelo y/o la retención de

residuos de cultivos. Estos dos factores juegan un papel muy importante en las características estructurales del suelo en distintos sistemas de manejo de cultivos (Pulleman et al., 2003).

2.2.2. Efectos Físicos

La labranza de la agricultura tradicional produce la fractura del suelo y rompimiento de agregados estables, conllevando a un detrimento de las propiedades físicas del suelo. Mientras, la agricultura de conservación, como paradigma emergente, ha sido objeto de numerosos estudios científicos que destacan sus beneficios físicos significativos para el suelo. Blanco-Moure et al. (2012) subrayan que esta práctica contribuye de manera sustancial al aumento de la materia orgánica, especialmente en la capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad, generando efectos positivos en la estructura del suelo y sus propiedades físicas, respaldados por las investigaciones de Hobson et al. (2022).

Un aspecto distintivo de la agricultura de conservación es la organización y estabilidad de su estructura del suelo, evidenciada por la presencia de bioporos creados por las raíces de las plantas y la actividad de la macrofauna, según señalan Pires et al. (2017). Este sistema no solo se considera ambientalmente sostenible, sino que también destaca por su sostenibilidad económica y social, mostrando su capacidad para integrar diversos aspectos del desarrollo sostenible. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, se ha observado que la compactación del suelo en sistemas de agricultura de conservación se manifiesta a una profundidad de aproximadamente 8 a 15 cm, según revela el estudio de Miguel Reichert et al. (2007). La complejidad resultante se debe a la variabilidad en suelos, usos, manejo, maquinaria y clima implicando que el comportamiento del suelo bajo estas condiciones diversas es intrincado, por lo que se requieren estudios específicos para comprender mejor la influencia de estas variables a lo largo del tiempo.

La adopción de la agricultura de conservación, a menudo como sustituto de prácticas tradicionales o de labranza mínima, según Kassam et al. (2022a), ha demostrado tener un impacto positivo significativo en la estructura del suelo, como resaltan. La sustitución de la labranza tradicional es especialmente relevante, ya que esta tiende a formar capas compactadas en el suelo, causadas por los neumáticos del tractor al correr en el fondo del surco del arado o en sí por la misma labranza, según indican Gao et al. (2016). Estas capas compactadas, presentes en suelos bajo labranza tradicional, actúan como obstáculos para el flujo de agua y aire en el suelo, así como para el crecimiento de raíces en capas más profundas, generando impactos negativos sobre el rendimiento de los cultivos, según señalan Vizioli et al. (2021). Además, la fracturación del suelo durante la labranza puede resultar en una estructura más compacta, mostrando cambios en la conductividad hidráulica y la retención de agua en el

suelo (Sartori et al., 2022). La erosión del suelo causada por la labranza intensiva también puede tener consecuencias a largo plazo en la salud del suelo y la productividad del cultivo, como indican Derpsch et al. (2010) y Lal et al. (2007).

Frente a los desafíos en la sostenibilidad del sistema agrícola, la agricultura de conservación destaca por su importancia en la mejora de la estructura del suelo y la promoción de sistemas agrícolas sostenibles, con una adecuada organización de la estructura del suelo, con una red de poros, continua y conectada, desempeña un papel crucial en la regulación del flujo de aire y agua en el suelo (Hamamoto et al., 2016). Las propiedades físicas del suelo, que controlan aspectos hidráulicos como la conductividad y la infiltración del agua, son fuertemente influenciadas por las prácticas de labranza, afectando a su vez el crecimiento de las plantas (Kuncoro et al., 2014). Sin embargo, a pesar de estos avances, los cambios experimentados en estas propiedades durante la transición al sistema de agricultura de conservación aún no se comprenden completamente. Los resultados muestran divergencias que podrían estar relacionadas con las interacciones entre diferentes suelos, climas y sistemas de cultivos (Blanco-Moure et al., 2012). La necesidad de una comprensión más profunda destaca la complejidad intrínseca de estos procesos y resalta la importancia de continuar investigando para optimizar los beneficios de la agricultura de conservación en términos de sostenibilidad del suelo y del sistema agrícola en su conjunto.

2.2.3. Efectos químicos

El depósito primordial de carbono orgánico en el suelo dentro de sistemas de agricultura convencional a menudo se vincula con niveles más elevados de acidez en comparación con sistemas de agricultura tradicional (Sithole et al., 2019). Esta acidez se asocia con la acumulación de cultivos de cobertura, ya sean vivos o muertos, así como con la presencia de ácidos orgánicos en las capas superficiales del suelo, junto con tasas más altas de mineralización de nitrógeno y la lixiviación de NO_3^- (Marschner, 2011). Un aumento en la emisión de exudados de raíces y la acumulación de raíces en la capa superficial del suelo también puede resultar en una reducción del pH del suelo (Limousin et al., 2007). La variación en el pH del suelo dependerá de la capacidad de amortiguación del suelo, los cambios en el contenido de materia orgánica, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo del nitrógeno. En entornos semiáridos sin la aplicación de fertilizantes sintéticos y sin la adición de cal, los ajustes en el pH pueden ser mínimos, oscilando entre 0 y 0.1 – 0.3 unidades de pH después de 10 años o más en agricultura convencional (Page et al., 2013). No obstante, al sembrar leguminosas y aplicar fertilizantes minerales nitrogenados, la disminución del pH

puede ser significativamente más pronunciada (Blanco-Moure et al., 2012; Han et al., 2020; Petit et al., 2022).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo desempeña un papel crucial en la fertilidad del suelo, la estabilidad estructural y la capacidad de regulación del pH del suelo, aunque la CIC es principalmente una característica intrínseca del suelo, determinada por su mineralogía y contenido de arcilla, también puede ser afectada por cambios en la materia orgánica del suelo y en el pH. En este contexto, la agricultura convencional tiene el potencial de influir en la CIC. La magnitud y dirección de estos cambios son variables, con ejemplos de incrementos (Sá et al., 2009), reducciones e impactos neutros (Sithole et al., 2019). La presencia de una CIC más elevada generalmente se relaciona con un mayor contenido de materia orgánica, lo que resulta en un aumento en la carga negativa (Duiker et al., 2006). En suelos donde se ha producido una disminución del pH, se puede observar una CIC más baja, con consecuente reducción en la concentración de cationes dependientes del pH en los sitios de intercambio (Sithole et al., 2019).

Aumentar el contenido de carbono orgánico en el suelo puede tener un impacto notable en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, debido a cambios en la cantidad como en la distribución de los nutrientes en el suelo. Cuando la agricultura de conservación aporta una mayor incorporación de residuos, significando una mayor entrada de nutrientes, puede resultar en un incremento de la materia orgánica en el suelo. Esto, a su vez, puede dar lugar a mayores reservas de nutrientes en el suelo para las plantas, incluyendo diferentes elementos (Sithole et al., 2019). Sin embargo, aunque en muchos casos este aumento puede significar una mayor acumulación de nutrientes en el suelo, no necesariamente se traduce en una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas. El N, a pesar de que la reserva puede ser mayor bajo la agricultura de conservación, la cantidad disponible para las plantas puede disminuir, especialmente poco después de la implementación de este método, pudiendo requerirse el suministro de fertilizantes nitrogenados para mantener el rendimiento de los cultivos (Tiritan et al., 2016). Esto puede ser atribuido a tasas más lentas de mineralización del N debido a la reducción de la mezcla suelo-rastrojo o residuos vegetales, y/o una mayor tasa de inmovilización causada por residuos de cultivos con relaciones C/N elevadas. En casos donde la inmovilización afecta la disponibilidad de N, se puede observar una mejora gradual en el suministro de N a medida que se establece una nueva relación entre el C y N (Soane et al., 2012). La falta de mezcla del suelo en sistemas de agricultura de conservación, especialmente aquellos con cero labranzas, puede conllevar a la estratificación de nutrientes inmóviles en el suelo (Dang et al., 2015). Esto podría ser un problema en zonas más áridas, donde el secado en

la superficie del suelo puede limitar el acceso de las raíces de las plantas a los nutrientes en las capas superficiales. Cuando los sistemas de agricultura de conservación resultan en suelos con mayor densidad aparente y menor porosidad de aire en condiciones húmedas, pueden observarse pérdidas de N debido a una mayor desnitrificación (Rochette, 2008).

2.3. Acidificación del suelo y encalado

La acidificación del suelo, otro fenómeno ampliamente observado, resulta en la disminución de la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. La solubilización del aluminio y la reducción de la absorción de nutrientes pueden afectar negativamente el rendimiento de los cultivos, con el maíz forrajero como uno de los cultivos susceptibles (Maria et al., 2006; Tiritan et al., 2016). Los suelos ácidos, con un pH menor o igual a 5,5, representan un desafío para la producción de maíz forrajero debido a la limitada disponibilidad de nutrientes esenciales (Gazey et al., 2009). La presencia de aluminio tóxico acentúa aún más la disminución en el rendimiento del maíz (Crusciol et al., 2019; Mutsamba et al., 2020). Además, el 40 - 50 % de los suelos agrícolas de todo el mundo son ácidos (Rahman et al 2018).

La estrategia más frecuentemente empleada para reducir la acidez en el suelo es el proceso de encalado. Este método logra una disminución rápida de la acidez del suelo (Crusciol et al., 2019). La movilidad de la cal a través del suelo experimenta variaciones según el tipo y la estructura del suelo, las propiedades inherentes del producto utilizado, las condiciones climáticas, el manejo de fertilizantes ácidos y el sistema de cultivo (Caires et al., 2005). En regiones con patrones de lluvia regulares, como áreas tropicales, no siempre se observan mejoras inmediatas en el rendimiento de los cultivos debido al encalado superficial, ya que se requiere la formación de una capa de suelo más espesa y de alta calidad química para alcanzar el rendimiento potencial de los cultivos (Dalla Nora et al., 2017). Por lo tanto, en áreas tropicales, donde los períodos de sequía coinciden con la temporada de lluvias y el invierno seco, la acidez en las capas más profundas del suelo emerge como un factor restrictivo para la productividad de los cultivos (Enesi et al., 2023). Este efecto se atribuye a la toxicidad del aluminio, que inhibe el crecimiento de las raíces a ciertas profundidades del suelo, generando estrés hídrico y obstaculizando la absorción de nutrientes (Tiritan et al., 2016). El encalado del suelo introduce iones OH^- para neutralizar los iones H^+ , reduciendo así la toxicidad del aluminio y aumentando la disponibilidad de fósforo, así como el suministro de calcio y/o magnesio. Además, al aliviar la acidez en las capas más profundas del suelo, se puede favorecer el desarrollo radicular de las especies cultivadas, lo que aumenta la capacidad de las plantas para tolerar el estrés hídrico en épocas secas y facilita la obtención de altos rendimientos (Caires et al., 2005).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y características del campo experimental

El estudio se realizó entre octubre 2022 a marzo del 2023 (desde inicio de ubicación, preparación de parcela, abarcó todo octubre; instalación de trampas, y medición de CO₂, noviembre y diciembre (58 días); y siembra y evaluación de variables en enero a marzo (87 días)) durante la temporada lluviosa con 100 mm/mes. El estudio fue desarrollado en el campo experimental del INIA, ubicado en el distrito de Campoverde, región de Ucayali, con coordenada X: 512537 m E y Y:9056310 m S. El paisaje es una terraza baja no inundable, y la parcela experimental estuvo cubierta por *Desmodium* sp. por más de 8 años sin ser removida, y ni una intervención agrícola adicional antes de este experimento. La región se situó a 193 m.s.n.m., con temperaturas que oscilan entre 30,3 y 35 °C, respectivamente, humedad relativa del 83 % y radiación solar de 156 w/m². El suelo fue clasificado como un Typic Dystrudepts (GOREU/ZEE 2017) con 53, 21 y 26 % de arena, limo y arcilla, respectivamente, conductividad eléctrica = 1,9 dS/m, pH_(1:1.25) = 5,1, materia orgánica = 2,15 %, niveles de fósforo (P) extractable (Bray) = 5,84 ppm, potasio (K) = 0,17 cmol⁽⁺⁾/kg, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) = 4,21 cmol⁽⁺⁾/kg y Al³⁺ = 54 %.

3.2. Diseño experimental y manejo de campo

Un diseño de parcelas divididas con bloques completamente al azar fue establecido. En la parcela principal, un factor labranza con dos niveles, agricultura de conservación (AC), y tradicional (AT); y otro factor encalante calcáreo con tres niveles: 0 kg/ha de enmienda calcárea (como testigo (T)), cal agrícola (C) y dolomita (D) en las subparcelas fueron establecidos, conformándose seis tratamientos, con cuatro repeticiones cada uno, los cuales fueron distribuidos al azar en cuatro bloques, haciendo un total de 24 unidades experimentales, cada una de 20 m² (Figura 1). Los promedios de las variables en estudio de cada una de las unidades experimentales fueron sometidos al análisis de variancia, a excepción del conteo de las lombrices, el cual fue transformado por $\sqrt{(x + 0.5)}$ para normalizar, previa remoción de datos outliers. La significación estadística fue determinada por la prueba DGC con un nivel de significación $p < 0.05$.

El modelo estadístico aditivo lineal fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \phi k + \alpha i + (\phi\alpha)ki + \beta j + (\alpha\beta)ij + \epsilon_{ijk}$$

(1)

Dónde:

Y_{ijk} : Observación de la unidad experimental.

μ : Media general

ϕ_k : Efecto de los bloques

α_i : Efecto del *i*-ésimo sistema de labranza

$(\phi\alpha)_{ki}$: Error de la parcela

B_j : Efecto del *j*-ésimo encalado

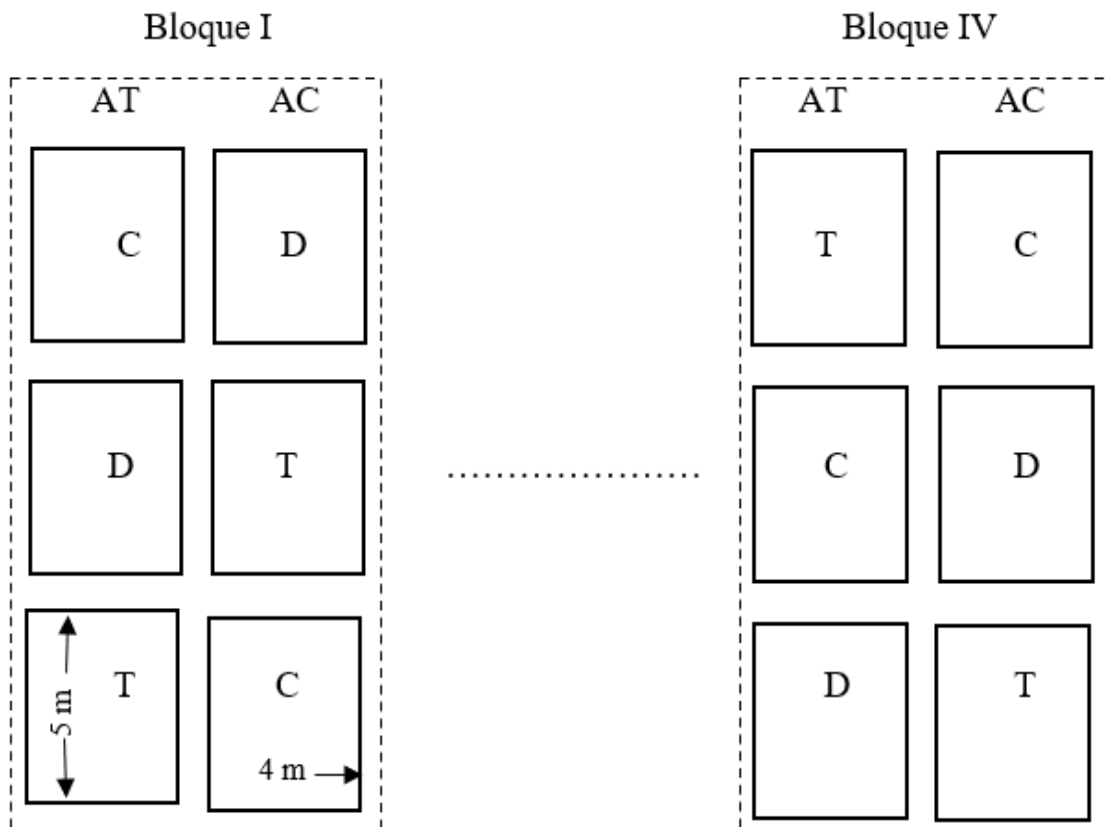
$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del *i*-ésimo sistema de labranza con *j*-ésimo encalado

ϵ_{ijk} : Error de la subparcela

i : 1, 2, 3,.....t (sistema de labranza)

j : 1, 2, 3,.....r (encalado)

k : 1.2.3,.....s (bloque)



⊞: parcela principal; □: sub parcela o unidad experimental; AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; C: cal; D: dolomita.

Figura 1. Croquis del diseño experimental en parcelas divididas con cuatro bloques de dos sistemas de labranza con aplicación de encalantes.

Antes de la siembra del maíz forrajero, la parcela principal fue preparada mediante el corte del *Desmodium* sp. a una altura de 5 cm, quedando $0,24 \pm 0,06$ kg/m² como cobertura vegetal esparcida homogéneamente sobre la superficie del suelo. En el caso del tratamiento de la agricultura tradicional, antes de la aplicación de los encalantes, el suelo fue labrado manualmente y la cobertura vegetal fue removida.

Enseguida, 9200 y 4416 kg/ha de cal agrícola (C) y dolomita (D), respectivamente, fueron aplicadas en las unidades experimentales asignadas. La aplicación de encalantes fue realizada en un mismo día, para el caso de la agricultura de conservación fue superficial y en la agricultura tradicional fueron incorporados manualmente con un pico como una herramienta agrícola, a una profundidad de 20 cm del suelo. La cal contuvo 90 % de carbonato de calcio (CaCO₃), y la dolomita un 30,8 % de óxido de calcio (CaO) más un 15,7 % de óxido de magnesio (MgO).

Finalmente, dos semillas de la variedad maíz forrajero INIA-2016 fueron sembradas por golpe, con un distanciamiento de 0,6 m x 0,20 m entre líneas y plantas, respectivamente, obteniendo una densidad potencial de 166666 plantas por hectárea. La primera fertilización fue realizada a una semana de la emergencia del maíz, aplicando una dosis de 100 Kg de nitrógeno/ha (N), 80 kg de pentóxido de fósforo/ha (P₂O₅) y 100 kg de óxido de potasio/ha (K₂O), cuyas fuentes de N, P₂O₅ y K₂O fueron la urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, respectivamente, y la segunda fertilización fue realizada 42 días después de la primera, con una dosis de 100 Kg N/ha.

3.3. Datos colectados

3.3.1. Variables evaluadas

Las variables de las propiedades del suelo y biometría y contenido foliar del maíz forrajero INIA 616 fueron recolectadas de las 24 unidades experimentales. Las variables fueron clasificadas en propiedades biológicas (2), físicas (3), químicas del suelo (9), biométricas y contenido foliar (9), haciendo un total de 23 variables evaluadas, las cuales son mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables evaluadas de las propiedades biológicas, físicas, químicas del suelo, biométricas y contenido foliar del maíz forrajero INIA 616.

| Propiedades | Variables | Abreviaturas y unidades |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Biológicas | Emisión de CO ₂ del suelo | ECO ₂ (gCO ₂ /m ² /h) |
| | Población de lombrices | PL (lombrices/m ²) |
| | Humedad gravimétrica | H° (%) |
| Físicas | Densidad aparente | Da (g/cm ³) |
| | Conductividad hidráulica | Ks (mm/s) |
| | Ca del suelo | Ca (%) |
| Químicas | Mg del suelo | Mg (%) |
| | K del suelo | K (%) |
| | Al del suelo | Al (%) |
| | Ca/Mg | Ca/Mg |
| | Mg/K | Mg/K |
| | Ca/K | Ca/K |
| | (Ca+Mg+K)/Al | (Ca+Mg+K)/Al |
| | pH del suelo | pH |
| | Altura de planta | A (cm) |
| | Índice de área foliar | IAF |
| Biométricas y contenido foliar | Forraje verde | FV (kg/ha) |
| | Forraje seco | FS (kg/ha) |
| | N foliar | N (g/kg) |
| | P foliar | P (g/kg) |
| | K foliar | K (g/kg) |
| | Ca foliar | Ca (g/kg) |
| | Mg foliar | Mg (g/kg) |

3.3.2. Medición de variables

La evaluación de las variables contempladas se realizó durante todo el periodo octubre 2022 a febrero del 2023, distribuidos en las fases de laboratorio y de campo. La metodología propuesta para la medición de las variables es descrita a continuación:

3.3.2.1. Variables biológicas del suelo

a. Emisión de CO₂ del suelo (ECO₂)

Un par de sistemas de cámaras cerradas en cada unidad experimental fueron instaladas. En el interior de cada cámara fue colocado un vaso de precipitado de 50 mL, conteniendo 35 mL de una solución de NaOH (0.5 M) para funcionar como trampa para del CO₂, los cuales fueron reemplazados, a la misma hora, cada 3 – 4 días hasta 21 días después de la primera instalación realizada inmediatamente después de la labranza. Recipientes de polipropileno con una capacidad de 3 L fueron usados como cámaras, las cuales fueron selladas herméticamente después de colocarlas, de modo invertido, sobre el suelo a una profundidad de 2 cm y sus bordes fueron selladas con barro. La captura del CO₂ se determinó mediante titulación del NaOH con una solución de ácido clorhídrico (HCl, 0,1 N), utilizando 2 mL de cloruro de bario (BaCl₂.2H₂O) (≥ 99,5 %, Merck, Alemania) conjuntamente con fenolftaleína como indicador. La titulación fue realizada inmediatamente después de retirarse la solución trampa de las cámaras cerradas, evitando el contacto con el aire y para corregir la cantidad calculada del CO₂, una trampa control sin suelo fue instalada (Anderson, 1982). Además, la temperatura y la humedad gravimétrica del suelo fueron registradas en cada reemplazo de la trampa de CO₂, a una profundidad de 5 cm en el suelo, cerca al borde externo de las cámaras, empleando un termómetro digital (TPg-101, WMETERS, China) y el método del cilindro, respectivamente. El ultimo método fue realizado usando un cilindro muestreador de 99 cm³, donde el suelo extraído tuvo el mismo volumen y los pesos de suelo húmedo fueron registrados, y secados en una estufa a 105 °C durante 48 horas (Shukla 2014) y la humedad del suelo fue hallada aplicando la siguiente fórmula:

$$H^{\circ}g = \frac{(Psh - Pss)}{Pss} \times 100 \% \quad (1)$$

Donde:

H^og: humedad gravimétrica (%)

Psh: peso de suelo húmedo (g)

Pss: peso de suelo seco (g)

b. Población de lombrices (PL)

El número de lombrices presentes en el suelo fue contabilizado (83 dds) a dos profundidades del suelo (0 - 10 y 10 - 20 cm), correspondiente cada profundidad a un volumen de un paralelepípedo de 20 cm de arista de base cuadrada, con 10 cm de altura. La cantidad de lombrices halladas fue multiplicada por 25, obteniéndose el número de lombrices/m² (Boomchamni et al., 2019).

3.3.2.2. Variables físicas del suelo

c. Humedad gravimétrica (H^o) y densidad aparente (Da)

La H° fue determinada (48 y 83 días después de la siembra (dds)) a dos profundidades del suelo, 0 - 10 cm y de 10 -20 cm, por el método del cilindro. Determinado el peso seco de suelo y conociendo el volumen del cilindro muestreador, la densidad aparente fue hallada (83 dds). La siguiente fórmula fue aplicada para determinar dicha variable (Bazán, 2017):

$$Da\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{Pss}{volumen\ total} \quad (2)$$

d. Conductividad hidráulica (Ks)

La Ks fue determinada (83 dds) usando un tubo metálico (20 cm de altura y 17 cm de diámetro) insertado a 1 cm de profundidad en el suelo, previa remoción de residuos extraños. Un volumen de 0,15 L de agua fue aplicado repetidas veces dentro del cilindro. El tiempo de cada infiltración fue registrado hasta que la última infiltración sea nula. La cantidad de infiltraciones con sus respectivos tiempos acumulados fueron recabados (Álvaro-Fuentes et al., 2019).

La infiltración y la infiltración acumulada fueron determinadas con las fórmulas siguientes:

$$I (mm) = \frac{\text{agua vertida en cada tiempo}}{\pi r^2}; Ia (mm) = \sum_{t=1}^N Ia \quad (3)$$

Donde:

I: infiltración

Ia: infiltración acumulada

r: radio del cilindro

N: número de volúmenes de agua (0,15 L) adicionados

t: tiempo acumulado (s)

La Ia vs tiempo fueron ploteadas, en ejes “Y” y “X”, respectivamente, para calcular la tasa de infiltración (IR) (mm/s) con la pendiente de la línea, estimada por un análisis de regresión. La Ks fue calculada con la siguiente fórmula:

$$Ks = \frac{IR}{0,467(1+\frac{2,92}{r\alpha^*})} \quad (4)$$

Donde:

IR: tasa de infiltración

r: radio del cilindro

$$\alpha^* = 0,0262 + 0,0035 \times \ln(IR) \quad (5)$$

3.3.2.3. Variables químicas del suelo

3.3.2.4. pH, cationes cambiabiles

Las muestras de suelo de cada unidad experimental fueron extraídas a partir de 5 submuestras y tomadas de 0-20 cm de profundidad del suelo, después de 58 días de la aplicación del encalantes. El Ca, Mg, K y el Al fueron determinados por el principio de espectrofotometría de absorción atómica (Bazán, 2017), usando como equipo un espectrofotómetro de absorción atómica (AA500, PGIstruments, Inglaterra), y fueron expresados en porcentaje. El pH fue medido por el método potenciométrico a través de una pasta saturada en equilibrio de suelo y agua, 1:1,25, respectivamente (Bazán, 2017), empleándose un potenciómetro (pH7310, Inolab, Alemania). Las relaciones catiónicas Ca/Mg, Mg/K, Ca/K y (Ca+Mg+K)/Al fueron calculadas por la división matemática de los respectivos cationes.

3.3.2.5. Variables biométricas y contenido foliar de nutrientes

e. Altura, índice de área foliar, forraje verde y seco

La altura de planta fue determinada midiendo desde el cuello de planta hasta el último nudo, usando un flexómetro, en la etapa de la floración completa (48 dds). El índice de área foliar (IAF) fue determinado (48 dds) por la relación entre el área foliar ocupada por las hojas (m^2) en una superficie de suelo (m^2) (Camacho et al. 1995). Las plantas correspondientes a 3 m de las líneas centrales de siembra, y repetidas 3 veces, de cada unidad experimental, fueron cortadas en su base, en estado lechoso (R3, 83 dds) y pesadas para determinar el forraje verde. De las cuales diez plantas fueron secadas a estufa a 72 °C por 72 horas para determinar el forraje seco (83 dds) (Iglesias et al., 2018).

f. N, P, K, Ca, Mg foliar

De diez plantas, las hojas opuestas a las mazorcas más altas fueron extraídas 48 dds, las cuales fueron lavadas y secadas a 65 °C por 72 horas en una estufa (UF450, MEMMERT, Alemania), luego fueron molidas usando un molino (FZ112, Solrimana, India). El N fue determinado por el método de micro-Kjeldahl (S2, Behr, Alemania), el K, Ca y Mg lecturadas con un espectrofotómetro de absorción atómica (AA500, PGIstruments, Inglaterra), y el P fue determinado por el método de Olsen (Bazán, 2017).

3.4. Análisis estadístico

Los valores atípicos de las variables analizadas fueron descartados. El conteo de la población de lombrices fue transformado, usando el factor $\sqrt{(x + 0.5)}$ para normalizar los datos. Para comparar los valores de las propiedades del suelo, biometría y contenido foliar de nutrientes del maíz forrajero fueron sometidos al análisis de variancia (ANVA) y a la prueba de DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves), con un nivel de significación de 5 % ($p < 0.05$). El programa de análisis estadístico InfoStat (2008) fue empleado para la evaluación estadística.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

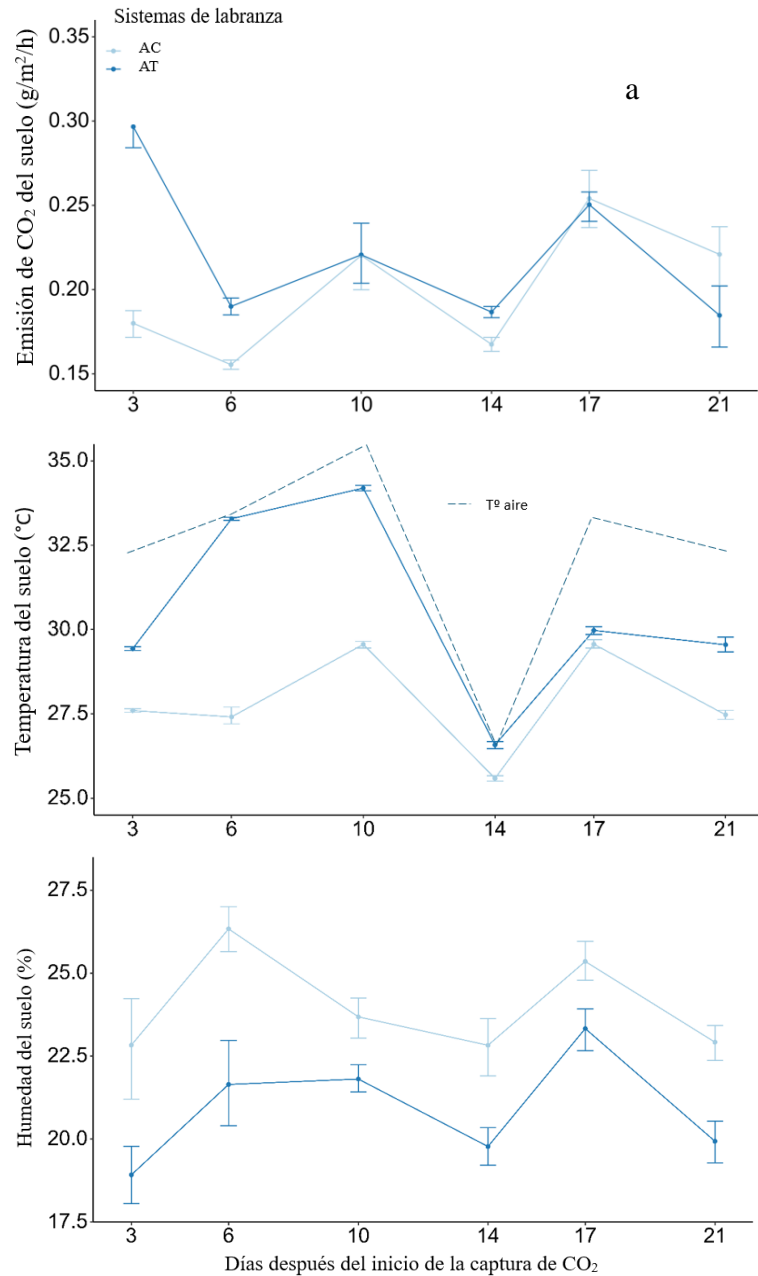
4.1. Variables biológicas del suelo

4.1.1. Emisión de CO₂ del suelo

La liberación de dióxido de carbono (CO₂) del suelo mostró diferencias estadísticamente significativas asociadas al sistema de labranza ($p < 0,05$), como se ilustra en la Figura 2a. En el tratamiento de la agricultura de conservación, las emisiones de CO₂ del suelo oscilaron entre $0,15 \pm 0,003$ y $0,25 \pm 0,01$ g CO₂/m²/h, mientras que en la agricultura tradicional variaron de $0,16 \pm 0,01$ a $0,30 \pm 0,01$ g CO₂/m²/h. Notablemente, en el tercer y sexto día, la agricultura tradicional emitió $0,12$ y $0,04$ g CO₂/m²/h más que la agricultura de conservación, respectivamente; representando el tercer día, el tiempo más cercano al inicio de la labranza, mostrando la mayor emisión de CO₂. Sin embargo, en el día 21, la agricultura de conservación emitió significativamente $0,05$ g CO₂/m²/h más que la agricultura tradicional ($p < 0,05$) (Figura 2a). Las emisiones de CO₂ aumentaron y disminuyeron de manera rítmica con la temperatura del aire y contenido de humedad del suelo, a excepción del tercer día (Figura 2a,b,c). Durante el muestreo de la emisión de CO₂, la temperatura del suelo de la agricultura tradicional fue en promedio $0,99 - 5,99$ °C más elevada que en la agricultura de conservación (Figura 2b), mientras que la humedad del suelo de la agricultura de conservación fue mayor en $1,8 - 5,1$ % en comparación con la agricultura tradicional (Figura 2c).

La variabilidad en las emisiones de CO₂ del suelo está influenciada por los sistemas de labranza, factores bióticos y abióticos, que alteran el microclima del suelo (Cárceles Rodríguez et al., 2022; Silva-Olaya et al., 2013). Los valores de emisión de CO₂ registrados en la agricultura tradicional y de conservación (Figura 2a) se aproximan a los resultados informados por Álvaro-Fuentes et al. (2007) y Farhate et al. (2019), quienes investigaron los efectos de la labranza en la emisión de CO₂ del suelo. Sin embargo, estos valores son inferiores en comparación con los reportados por La Scala et al. (2006) y Toufeeq et al. (2020). El pico de mayor emisión de CO₂ del suelo (Figura 2a) en la agricultura tradicional podría atribuirse al aumento de la oxidación del carbono orgánico después de la labranza, liberando mayores cantidades de CO₂ a la atmósfera (Toufeeq et al., 2020). En los primeros muestreos, la agricultura tradicional exhibió una emisión superior a la agricultura de conservación, lo cual concuerda con los hallazgos de Álvaro-Fuentes et al. (2007), La Scala et al. (2006), Silva-Olaya et al. (2013) y Toufeeq et al. (2020) cuyos experimentos con suelos bajo la agricultura tradicional mostraron un incremento de $1,26$, $1,3$, $0,32$ y $34,8$ g CO₂/m²/h, respectivamente, en comparación con los de la agricultura de conservación. Las emisiones de CO₂ que no presentaron diferencias significativas entre la agricultura tradicional y de

conservación (día 10 y 17 de muestreo) ($p > 0.05$) posiblemente se debieron a factores de prácticas agrícolas no controladas, y a las temperaturas de suelo similares, respectivamente, ya que este factor abiótico está estrechamente correlacionado con la actividad microbiana (Carbonell-Bojollo et al., 2019; La Scala et al., 2006).

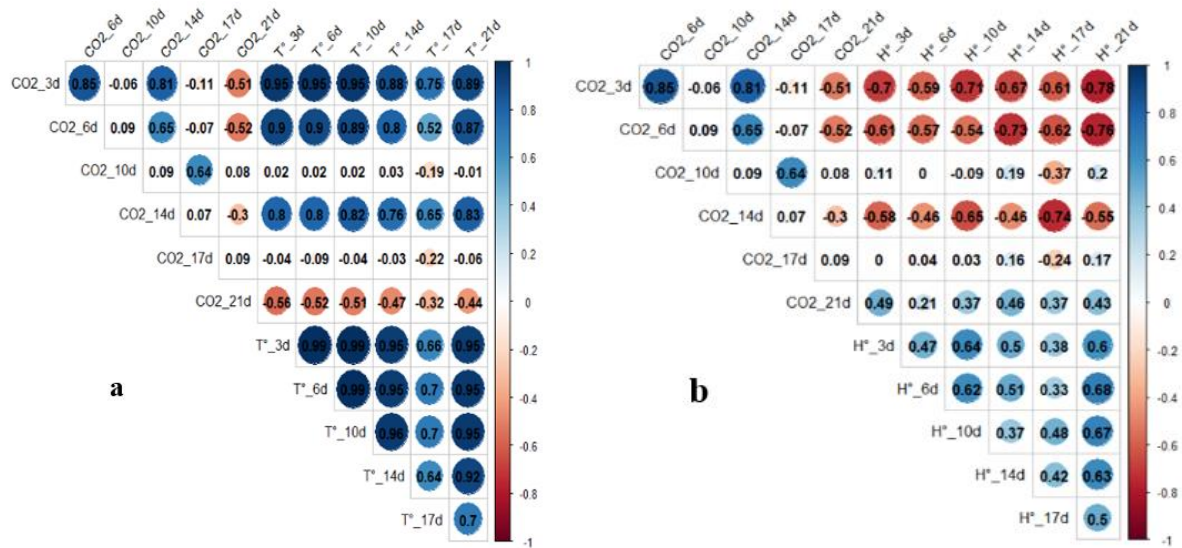


AT: agricultura tradicional; AC: agricultura de conservación.

Figura 2. Promedio \pm error estándar de la emisión de CO₂ del suelo (a), temperatura (b) y humedad (c) del suelo para los sistemas de labranza por 21 días.

La relación entre la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y la temperatura y humedad del suelo evidenció una correlación positiva significativa ($r = 0.65$).

a 0,95) y negativa ($r =$ de $-0,46$ a $-0,78$), respectivamente, en el tercer, sexto y decimocuarto día de muestreo (Figura 3). Estos hallazgos son consistentes con resultados similares obtenidos por Bilgili et al. (2013). No obstante, en el vigésimo primer día, estas correlaciones mostraron una inversión de sus patrones, siendo negativa con la temperatura y positiva con la humedad del suelo (Figura 3). Esta variación puede atribuirse a la mayor disminución en la humedad del suelo y, en menor medida, a la temperatura (Figura 2), posiblemente influenciada por prácticas culturales como el control de malezas, que pueden alterar la cantidad de CO_2 emitido (Álvarez-Fuentes et al., 2007; La Scala et al., 2006; Silva-Olaya et al., 2013).



T°, H°, y CO₂: temperatura, humedad y emisión de CO₂ del suelo, respectivamente, a los 3, 6, 10, 14, 17 y 21d (días) de muestreo

Figura 3. Matriz de coeficientes de la correlación de Pearson de la emisión de CO₂ del suelo con la temperatura (a) y la humedad (b) del suelo.

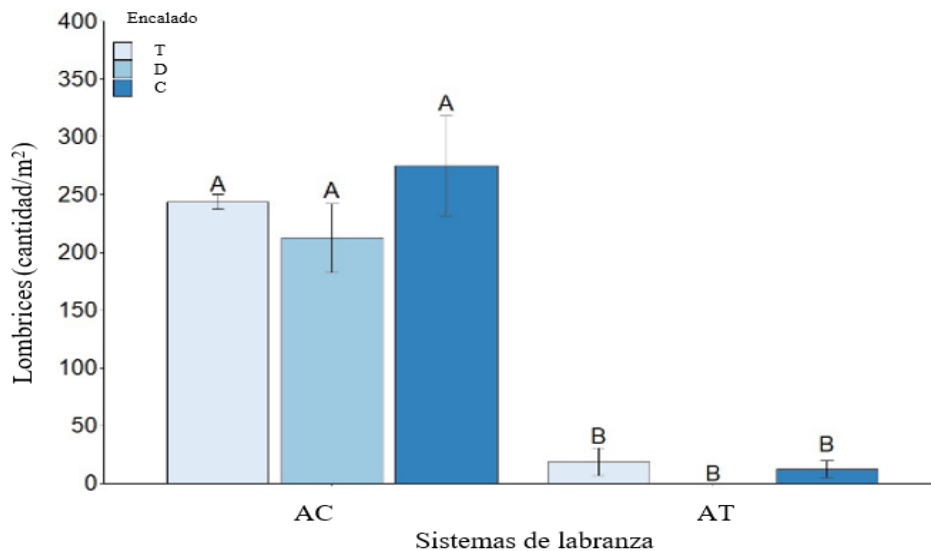
4.1.2. Población de lombrices

La Figura 4 presenta los valores medios acompañados de errores estándar de la población de lombrices, analizadas a una profundidad del suelo de 0-10 cm. En términos generales, se observaron diferencias estadísticamente significativas en la interacción entre el sistema de labranza y la aplicación de encalantes ($p < 0,05$). Las interacciones de agricultura de conservación (AC) con el testigo (T), cal (C) y dolomita (D) exhibieron 263, 212 y 224 lombrices/m² más que en la interacción de la agricultura tradicional (AT) con el testigo, cal y dolomita, respectivamente. Sin embargo, al analizar los factores por separado, únicamente el sistema de labranza mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,05$), mientras que el factor encalante no resultó significativo ($p > 0,05$). La población de lombrices en la agricultura de conservación reportó 233 lombrices/m² más en comparación que la agricultura tradicional

(AT). Además, la población de lombrices no fue hallada en la capa de suelo de 10 a 20 cm de profundidad en la agricultura de conservación y tradicional; ni en la interacción ATxD en la profundidad de 0 – 10 cm (Figura 4).

Estos resultados indican que el tratamiento de la agricultura de conservación mostró un aumento significativo en la población de lombrices en comparación con la agricultura tradicional. Este incremento puede atribuirse a la ausencia de daño físico causado por la labranza del suelo (Blanchart et al., 1999; Cárceles Rodríguez et al., 2022; van Capelle et al., 2012), a una mayor H° del suelo (Muoni et al., 2019; Nurul Aini et al., 2019; Shaaban et al., 2020) en la agricultura de conservación en comparación con la agricultura tradicional ($10,89 \pm 0,72$ y $9,93 \pm 0,51$ %, respectivamente, Figura 5), y a la presencia de $0,24 \pm 0,06$ kg/m² de cobertura vegetal de *Desmodium* sp. en la AC, la cual proporcionó alimento para las lombrices (Muoni et al., 2019).

Análogamente, los estudios previos han informado que las cantidades de lombrices/m² en suelos bajo la agricultura de conservación fueron significativamente mayores, con diferencias de 24, 17 y 52 lombrices/m² más que en los suelos bajo agricultura tradicional. Este fenómeno es atribuido posiblemente a la eliminación de la labranza y la presencia de rastrojo sobre el suelo, condiciones que crean un ambiente abiótico propicio para el desarrollo de las lombrices (Nurul Aini et al., 2019).



AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; D: dolomita; C: cal; A–B: letras diferentes dentro de los sistemas de labranza indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba DGC con $p < 0,05$.

Figura 4. Medias aritméticas y errores estándar del número de lombrices a 0-10 cm de profundidad, bajo la interacción sistema de labranza × encalado.

La población de lombrices con la conductividad hidráulica (Ks) y la densidad aparente (Da) mostraron una correlación negativa y positiva ($r = - 0,93$ y $r = 0,43$),

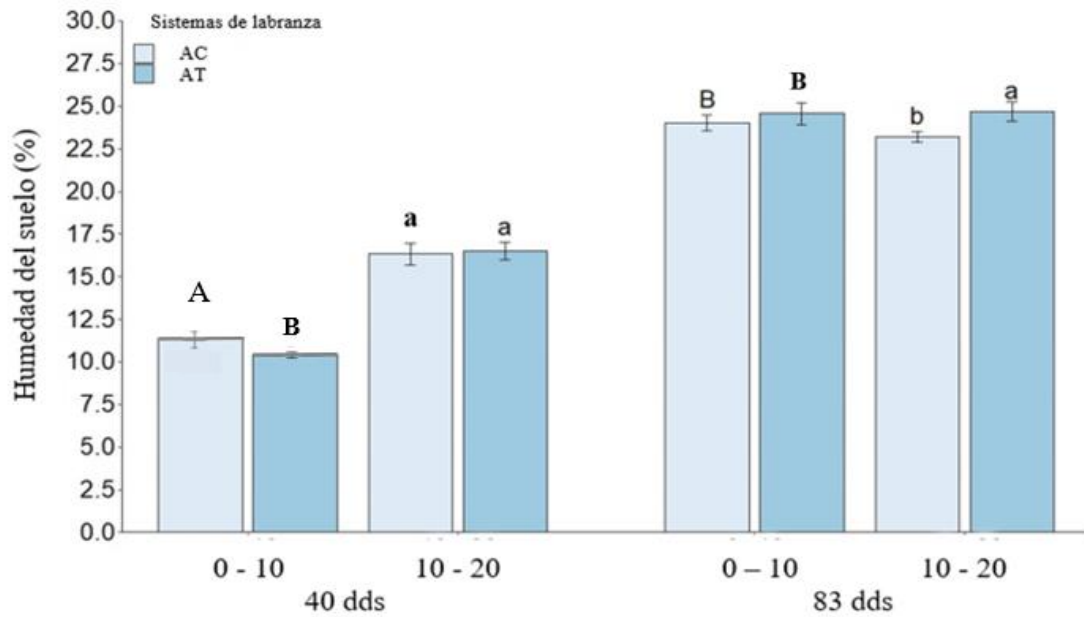
respectivamente, probablemente debido a cierta población de “especies de lombrices compactadoras del suelo” como *Millsonia anomala*, encontrada normalmente en la Amazonía peruana (Blanchart et al., 1999), la cual podría incrementar la Da y por lo tanto disminuir la Ks. El contenido de Ca foliar y las lombrices reportaron un coeficiente de correlación negativo débil ($r = -0,41$), probablemente porque la lombriz es un organismo competidor de Ca de la biota del suelo (Boonchamni et al., 2019), evidenciándose por el alto contenido de Ca en los nidos de lombrices comparado con el suelo agrícola, 5 y 3,93 ppm, respectivamente (Lemtiri et al., 2014), incluso en otros nidos el contenido de Ca almacenó 2296,2 ppm, siendo el elemento más requerido por las lombrices (Boonchamni et al., 2019).

4.2. Variables físicas del suelo

4.2.1. Humedad gravimétrica (H°)

En el primer muestreo (48 dds), el factor sistema de labranza expresó diferencia estadística significativa ($p < 0,05$) sobre la H° de las dos capas del suelo. En la primera capa, la H° de la AC fue mayor que la AT por 0,96 %. En la capa 10 -20 cm, la H° fue 0,18 % más en el suelo de la agricultura tradicional que en la agricultura de conservación (Figura 5). En el segundo muestreo (83 dds), las H° en los sistemas de labranza mostraron contenidos significativamente similares ($p > 0,05$) en ambas profundidades y fueron mucho mayores que el primer muestreo (Figura 5). Además, el encalado y la interacción del sistema de labranza x encalado no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) en la H° del suelo en ambas profundidades y en los dos muestreos.

La H° en el suelo de la agricultura de conservación fue mayor que en la agricultura tradicional en la primera capa de suelo en el primer muestreo, porque posiblemente la evaporación del agua del suelo fue menor debido a la presencia de la cobertura vegetal sobre el suelo de la agricultura de conservación (Carbonell-Bojollo et al., 2019; Mloza-Banda et al., 2016). De modo opuesto, en la segunda capa, la H° de la agricultura tradicional fue mayor que la agricultura de conservación, posiblemente porque debajo de la primera capa, hay una capa arcillosa la cual no permitió un buen drenaje, acumulándose mayor cantidad de agua en la segunda capa y además porque al labrar, un “piso de labranza” es generado y no permite el drenaje adecuado del agua (Pisante et al., 2011). En el segundo muestreo, la H° coincidió con fuertes precipitaciones, mostrando H° sin diferencia significativa ($p > 0,05$) y mayores que el primer muestreo.



AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; 0-10, 10-20: profundidades del suelo (cm); dds: días después de la siembra; A-B/a-b: letras diferentes dentro de una profundidad de suelo indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba DGC con $p < 0,05$.

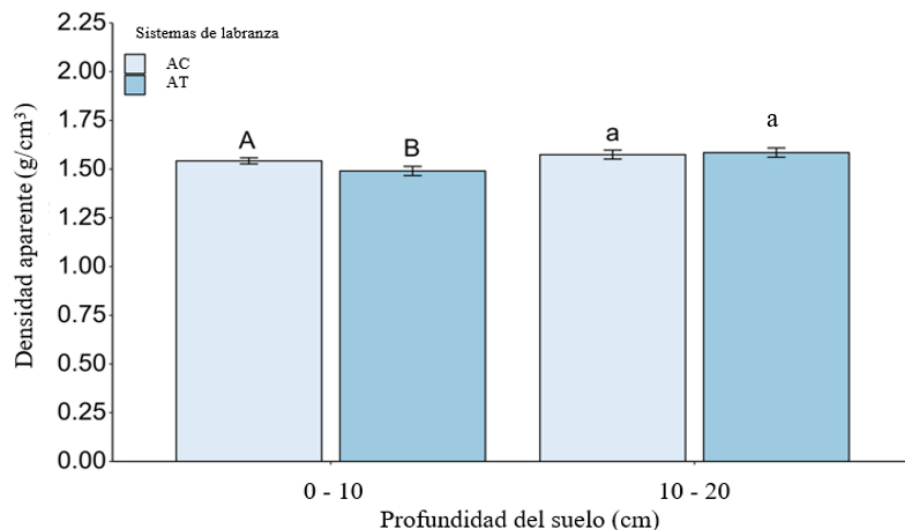
Figura 5. Medias aritméticas y errores estándar de la humedad gravimétrica del suelo en dos momentos de muestreo, a dos profundidades del suelo.

4.2.2. Densidad aparente (Da)

El factor sistema de labranza mostró diferencia significativa ($p < 0,05$) sobre la Da a dos profundidades de suelo de 0 – 10 y 10 – 20 cm. En la primera capa, la Da del suelo de la agricultura de conservación fue $1,54 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, la cual representó el 3,5 % más que en la agricultura tradicional; caso contrario fue reportado en la segunda capa, la Da en la agricultura tradicional arrojó $1,58 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, un 0,65 % más densa que en la agricultura de conservación (Figura 6). Además, en las dos capas de suelo, el factor encalado y la interacción sistema de labranza x encalado no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$). Sin embargo, la Da en los dos tipos de sistema de labranza no representaron la Da ideal para su textura franco arcillo arenosa, la cual debe ser menor a $1,4 \text{ g/cm}^3$, ni representaron una Da restrictiva para las raíces por presentar valores menores a $1,75 \text{ g/cm}^3$ (Jorge Álvaro-Fuentes et al., 2019).

La Da juega un rol muy importante en el suelo porque influye en el grado de compactación, movimiento de solutos y agua, aireación del suelo y drenaje (Cárceles Rodríguez et al., 2022), y de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, el sistema de labranza repercutió sobre la Da del suelo. La Da del suelo de la agricultura de conservación, en la primera capa, fue mayor que la agricultura tradicional, similar efecto fue determinado en

investigaciones análogas, en suelos con texturas diferentes (da Veiga et al., 2008; Monneveux et al., 2006; Nyambo et al., 2022). Sin embargo, el impacto de la agricultura de conservación y tradicional sobre la Da de los suelos es variado de acuerdo a diferentes estudios. El menor valor de la Da en la agricultura tradicional en la primera capa podría ser explicado por la fractura mecánica del suelo por la labranza y la reducción de la porosidad total (da Veiga et al., 2008; Guan et al., 2014; Nyambo et al., 2022) y por no tener elevado contenido de arcillas (Nyamangara et al., 2014). Sin embargo, al inicio de la transición de la agricultura tradicional y de conservación, las Da del suelo no mostraron diferencia significativa (Bai et al., 2022; Cerdà et al., 2020; Mloza-Banda et al., 2016; Nyambo et al., 2022; Sartori et al., 2022; Sithole et al., 2019). En otros estudios, la Da del suelo de la agricultura tradicional fue significativamente mayor que la agricultura de conservación, pero sólo en suelos con alto porcentaje de arcilla (Nyamangara et al., 2014). Además, la Da en suelo bajo la agricultura de conservación a través de varias campañas de siembra fue significativamente menor que en la agricultura de conservación (Sartori et al., 2022). En este estudio, la Da con la H° de la primera y segunda capa del suelo (en el segundo muestreo de humedad) mostraron una correlación negativa ($r = -0,67$ y $-0,65$), coincidiendo con diferentes estudios, probablemente porque al aumentar la densidad, disminuye la porosidad, reduciendo el espacio para la humedad (Marschner, 2011; Nemček -Korenkova et al., 2012).



AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; A–B/a–b: letras diferentes dentro de una profundidad de suelo indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de DGC con $p < 0,05$.

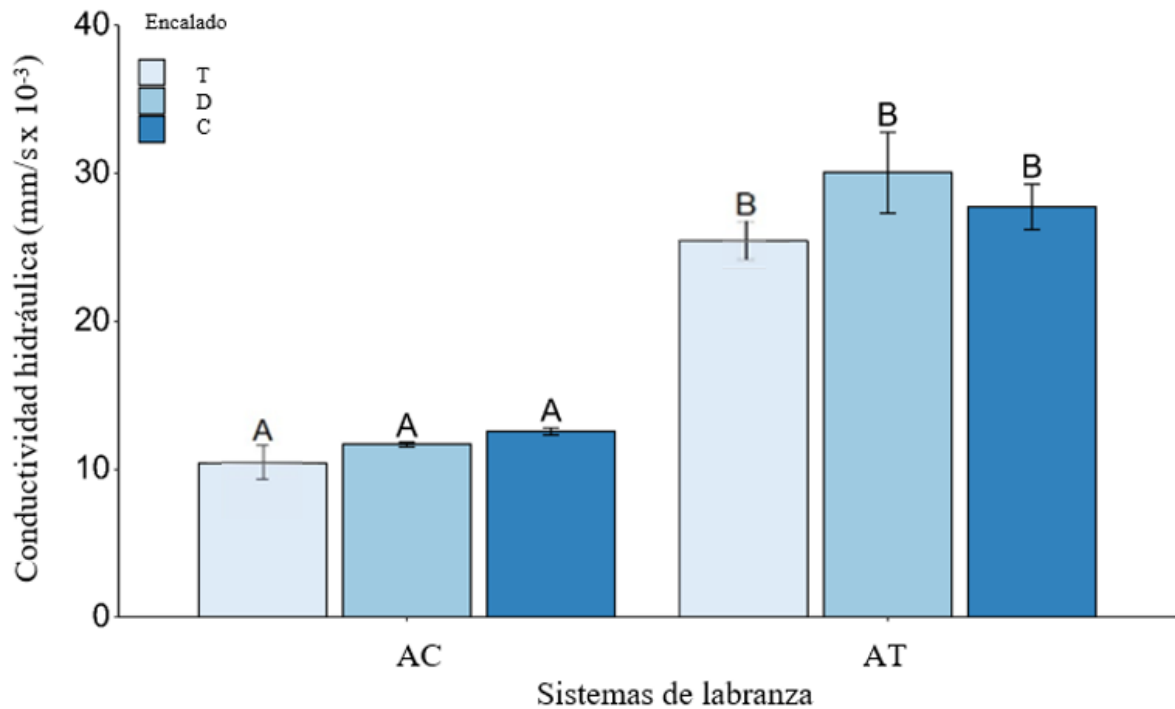
Figura 6. Medias aritméticas y errores estándar de densidad aparente bajo los sistemas de labranza a dos profundidades del suelo.

4.2.3. Conductividad hidráulica (Ks)

La interacción del sistema de labranza x encalado mostró diferencia significativa ($p < 0,05$), donde las interacciones de la agricultura tradicional (AT) con el testigo, cal y dolomita fueron $15,04 \times 10^{-3}$, $16,05 \times 10^{-3}$ y $17,40 \times 10^{-3}$ mm/s más que en la agricultura de conservación (AC) con el testigo, cal y dolomita, respectivamente (Figura 7). Al analizar individualmente los factores, sólo el factor sistema de labranza (AT y AC) mostró diferencia significativa ($p < 0,05$), donde la Ks de la agricultura tradicional y la de conservación fueron $27,73 \pm 1,11 \times 10^{-3}$ y $11,54 \pm 0,03 \times 10^{-3}$ mm/s, respectivamente.

Dichos resultados muestran que la Ks fue fuertemente influenciada por el tipo de sistema de labranza, atributo muy importante para el crecimiento de las plantas y la vida del suelo, porque una adecuada Ks aumenta el intercambio de CO_2 con el O_2 en el suelo, y la absorción de agua y nutrientes por las raíces aumenta considerablemente (Marschner, 2011). La agricultura tradicional y de conservación mostraron una Ks moderadamente rápida y moderada, respectivamente (Tiritan et al., 2016), donde la Ks de la agricultura tradicional fue mucho mayor que la agricultura de conservación porque el suelo fue labrado (Fuentes et al., 2004; Hu et al., 2009), provocando el incremento intempestivo de la ks en la agricultura tradicional (Mloza-Banda et al., 2016). Dicho resultado es análogo en un estudio de conversión de la agricultura tradicional a la de conservación, donde la Ks del primero fue $4,5 \times 10^{-3}$ mm/s más que en la agricultura de conservación (Mloza-Banda et al., 2016). Sin embargo, las Ks en suelos de agricultura de conservación infiltraron $7,1 \times 10^{-3}$, $7,9 \times 10^{-3}$, $5,3 \times 10^{-3}$ mm/s más rápido que en la agricultura tradicional, según (Carbonell-Bojollo et al., 2019; Sartori et al., 2022), respectivamente. En otros estudios, al inicio de la transición de la agricultura tradicional a la de conservación, las ks no mostraron diferencias significativas, $42,7 \times 10^{-3}$ vs $42,2 \times 10^{-3}$; $9,1 \times 10^{-3}$ vs $16,1 \times 10^{-3}$ mm/s, respectivamente (Bai et al., 2022; Guan et al., 2014). En este estudio, la menor ks de la agricultura de conservación que la tradicional (Figura 7) es explicado por su mayor densidad aparente que la agricultura tradicional (0-10 cm de profundidad), $1,54 \pm 0,02$ y $1,48 \pm 0,02$ g/cm³ (Figura 6) respectivamente, evidenciándose a través de una correlación negativa ($r = -0,35$) con la Da (0 -10 cm), causando menor Ks, probablemente debido a la disminución del espacio poroso del suelo (Shaaban et al., 2020).

Además, la Ks y la producción de forraje verde mostraron una correlación positiva media ($r = 0,48$), probablemente porque la Ks favoreció un adecuado intercambio de O_2 (Marschner, 2011), favoreciendo la producción o rendimiento de los cultivos.



AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; D: Dolomita; C: cal; A-B: letras diferentes dentro de los sistemas de labranza indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de DGC con $p < 0.05$.

Figura 7. Medias aritméticas y errores estándar de la conductividad hidráulica bajo la interacción entre los sistemas de labranza y encalado.

4.3. Variables químicas del suelo

Considerando sólo el efecto del factor encalado y la interacción del sistema de labranza x encalado se reportaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en el porcentaje de nutrientes del suelo, relaciones catiónicas y el pH del suelo (Tabla 2 y 3).

La adición de encalantes disminuyó significativamente la concentración de K y Al en el suelo ($p < 0,05$). La disminución de dichos elementos fue mayor con la aplicación de cal que con la dolomita, el cual repercutió análogamente en las interacciones de los sistemas de labranza (AT y AC) con dichos encalantes.

Además, la concentración de Ca en el suelo incrementó 37,8 % más con la aplicación de cal que dolomita, por lo tanto, las relaciones catiónicas con Ca incrementaron, Ca/Mg, Ca/K y (Ca+Mg+K)/Al, 6,6, 2,8 y 22,8 veces más que la dolomita, respectivamente y también las interacciones de la cal x sistema de labranza mostraron los mejores resultados sobre dichas relaciones catiónicas (Tabla 2). Mientras, la adición de dolomita mostró el mayor incremento en la concentración de Mg y la relación Mg/K, comparado con la cal, 11,1 % y 2,3 veces, respectivamente. Además, repercutieron análogamente en las interacciones de la dolomita x sistema de labranza, mostraron los mayores valores en estas dos variables (Tabla 3).

Además, el factor encalante incrementó significativamente ($p < 0,05$) el pH del suelo, cuyos valores de la cal y dolomita fueron iguales, pero mayores en 1.03 que el tratamiento control, cuyo efecto fue reflejado en las interacciones del encalante x sistemas de labranza, donde aquellas asociados a los encalantes no mostraron diferencia significativa ($p > 0,05$), pero fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) a las interacciones sin encalantes (Tabla 2 y 3).

Tabla 2. Promedios \pm error estándar de la dinámica de los cationes del suelo bajo sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza x encalado.

| Factores | K | Mg | Ca | Al |
|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | % | | | |
| Sistemas de labranza (SL) | | | | |
| AC | 2,58 \pm 0,25 a | 7,29 \pm 1,34 a | 60,95 \pm 7,19 a | 29,18 \pm 6,71 a |
| AT | 2,57 \pm 0,03 a | 8,50 \pm 1,72 a | 63,00 \pm 6,68 a | 25,93 \pm 6,13 a |
| Encalado (E) | | | | |
| T | 3,66 \pm 0,20 a | 4,81 \pm 0,27 b | 37,93 \pm 1,26 c | 53,60 \pm 1,55 a |
| C | 1,53 \pm 0,12 c | 3,91 \pm 0,30 b | 92,88 \pm 0,32 a | 1,68 \pm 0,13 c |
| D | 2,52 \pm 0,12 b | 14,97 \pm 0,65 a | 55,13 \pm 0,50 b | 27,39 \pm 0,96 b |
| SL x E | | | | |
| ACxT | 3,44 \pm 0,30 a | 4,72 \pm 0,34 c | 35,82 \pm 1,84 d | 56,03 \pm 2,24 a |
| ACxC | 1,69 \pm 0,21 c | 3,65 \pm 0,33 c | 92,87 \pm 0,42 a | 1,81 \pm 0,25 e |
| ACxD | 2,60 \pm 0,16 b | 13,52 \pm 0,31 b | 54,18 \pm 0,25 b | 29,71 \pm 0,19 c |
| ATxT | 3,89 \pm 0,24 a | 4,90 \pm 0,47 c | 40,05 \pm 1,03 c | 51,17 \pm 1,48 b |
| ATxC | 1,38 \pm 0,10 c | 4,18 \pm 0,52 c | 92,89 \pm 0,55 a | 1,55 \pm 0,05 e |
| ATxD | 2,44 \pm 0,19 b | 16,42 \pm 0,69 a | 56,08 \pm 0,71 b | 25,07 \pm 0,84 d |

AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; C: cal; D: dolomita; a – e: letras minúsculas diferentes en una columna indica diferencia significativa entre los sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza x encalado, de acuerdo a la prueba de comparación DGC ($p < 0,05$).

El suministro de encalantes al suelo ácido es crucial para incrementar el Ca, pH y disminuir el Al (Mahmud et al., 2022; Shaaban et al., 2020). Con la adición de la cal agrícola y la dolomita, el Ca y pH incrementaron, disminuyendo el Al, mostrando mejores resultados la cal agrícola (Tabla 1). Además, el pH mostró un coeficiente de correlación, $r = 0,86$ y $-0,87$ con el Ca y el Al, respectivamente, probablemente porque los encalantes en suelo ácido se disocian, liberando cationes (Ca), hidroxilos y bicarbonatos, los cuales disminuyen la actividad del Al, e incrementan el pH del suelo (Rheinheimer et al., 2000; Shaaban et al., 2020; Tiritan et al., 2016) y porque la infiltración del agua incrementa, dispersando la disolución del encalante similarmente a la agricultura tradicional, aumentando la disponibilidad de nutrientes, pH y disminuyendo la saturación de Al a 13 % en la agricultura tradicional y a 27 % en la agricultura de conservación (Vieira et al., 2006; Tiritan et al., 2016). En concordancia,

resultados semejantes fueron obtenidos al aplicar 8,5 t/ha de cal agrícola (Rheinheimer et al., 2000; Shaaban et al., 2020) y 4 t/ha de dolomita (Díaz Miguel et al., 2022).

Tabla 3. Promedios \pm error estándar de las relaciones catiónicas y pH bajo sistemas de labranza, encalado y sistemas de labranza x encalado.

| Factores | Ca/Mg | Mg/K | Ca/K | (Ca+Mg+K)/Al | pH |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Sistemas de labranza (SL) | | | | | |
| AC | 12,60 \pm 3,00 a | 2,97 \pm 0,51 a | 29,76 \pm 6,41 a | 20,55 \pm 8,63 a | 5,51 \pm 0,15 a |
| AT | 11,68 \pm 2,67 a | 3,78 \pm 0,75 a | 34,16 \pm 7,74 a | 22,53 \pm 8,79 a | 5,63 \pm 0,15 a |
| Encalado (E) | | | | | |
| T | 8,01 \pm 0,42 b | 1,36 \pm 0,10 c | 10,49 \pm 0,39 c | 0,88 \pm 0,05 b | 4,93 \pm 0,05 b |
| C | 24,66 \pm 1,73 a | 2,68 \pm 0,28 b | 63,14 \pm 4,54 a | 61,06 \pm 4,81 a | 5,96 \pm 0,10 a |
| D | 3,74 \pm 0,14 c | 6,08 \pm 0,49 a | 22,25 \pm 1,10 b | 2,68 \pm 0,14 b | 5,96 \pm 0,10 a |
| SL x E | | | | | |
| ACxT | 7,68 \pm 0,52 b | 1,43 \pm 0,16 d | 10,58 \pm 0,67 c | 0,80 \pm 0,07 b | 4,88 \pm 0,05 b |
| ACxC | 26,10 \pm 2,32 a | 2,23 \pm 0,10 d | 57,58 \pm 6,61 a | 58,50 \pm 9,94 a | 5,87 \pm 0,03 a |
| ACxD | 4,03 \pm 0,10 b | 5,25 \pm 0,32 b | 21,13 \pm 1,50 b | 2,35 \pm 0,03 b | 5,88 \pm 0,05 a |
| ATxT | 8,35 \pm 0,68 b | 1,30 \pm 0,12 d | 10,40 \pm 0,49 c | 0,95 \pm 0,06 b | 4,98 \pm 0,09 b |
| ATxC | 23,23 \pm 2,68 a | 3,13 \pm 0,48 c | 68,70 \pm 5,63 a | 63,63 \pm 2,17 a | 6,03 \pm 0,18 a |
| ATxD | 3,45 \pm 0,17 b | 6,90 \pm 0,75 a | 23,38 \pm 1,60 b | 3,00 \pm 0,14 b | 5,88 \pm 0,03 a |

AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; C: cal; D: dolomita; a – e: letras minúsculas diferentes en una columna indica diferencia significativa entre los sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza x encalado, de acuerdo a la prueba de comparación DGC ($p < 0.05$).

En este estudio, el Ca y el Al mostraron una correlación negativa fuerte ($r = -0,97$) por la aplicación de los encalantes, probablemente por formarse compuestos orgánicos solubles en agua y por el intercambio del Ca con el Al, quedando este inactivo (Vieira et al., 2006) en forma precipitada (Tiritan et al., 2016). La disminución del K en el suelo mostró una correlación negativa fuerte ($r = -0,86$) con el Ca por el incremento del Ca debido al suministro en los encalantes y probablemente por ser antagonistas (Morais et al., 2023). Además, el Ca mostró una correlación positiva fuerte con el índice de área foliar, la materia seca y el contenido de N foliar ($r = 0,61, 0,52$ y $0,64$, respectivamente), lo cual podría explicarse por el incremento del área foliar (de 3,58 a 4,72) y la materia seca, probablemente la demanda de nutrientes como N proteico y Ca incrementaron notablemente (Iglesias et al., 2018).

La relación Ca/Mg mostró una correlación positiva con el índice de área foliar, materia seca y N foliar ($r = 0,55, 0,57$ y $0,73$, respectivamente), porque a mayor área foliar y materia seca, probablemente es necesario mayor contenido de Ca para la formación de paredes celulares, y el Mg es requerido proporcionalmente a mayor contenido de N foliar para producir, transportar, usar fotoasimilados (estado reproductivo lechoso del maíz, R3), síntesis proteínas

y la formación de los anillos pirrólicos de la clorofila (Ishfaq et al., 2022). La relación Mg/K mostró una correlación positiva ($r = 0,64$) con el contenido de P foliar, debido a que el Mg y P son sinérgicos, y un adecuado balance del Mg y K son fundamentales para incrementar la absorción del P foliar (Morais et al., 2023).

4.4. Variables biométricas y foliares del maíz forrajero

4.4.1. Altura, índice de área foliar, forraje verde y seco

El factor sistema de labranza influyó significativamente ($p < 0,05$) sobre la altura de la planta, forraje verde y rendimiento de forraje seco del maíz forrajero INIA 616. El rendimiento de forraje verde y forraje seco en la agricultura tradicional arrojaron 6,45 y 0,68 t/ha más que la agricultura de conservación, respectivamente (Tabla 2). Sin embargo, el sistema de labranza no mostró diferencia estadística significativa ($p > 0,05$) sobre el índice de área foliar (IAF).

La cal agrícola, y la interacción agricultura tradicional x cal mostraron significativamente ($p < 0,05$) los mayores IAF, $4,72 \pm 0,26$ y $5,16 \pm 0,37$, así como los mayores rendimientos de materia seca del forraje, $18,72 \pm 0,80$ y $19,72 \pm 1,12$ respectivamente (Tabla 2). La cal agrícola mostró 7,35 t/ha de forraje verde más que la dolomita, y su interacción con los sistemas de labranza no mostraron diferencia estadística significativa ($p < 0,05$).

La agricultura tradicional y la cal agrícola mostraron mayores rendimientos de maíz forrajero verde y seco que la agricultura de conservación y la dolomita, respectivamente. Los rendimientos de los cultivos comparados entre la agricultura de conservación y tradicional son diversos. El rendimiento de forraje en la agricultura tradicional arrojó 6,45 t/ha más que la de conservación (Tabla 2). Análogamente, en otras investigaciones, el rendimiento de grano de maíz en la agricultura tradicional fue 29,3 y 51,08 % más que la agricultura de conservación, según (Martínez-Gamiño et al., 2019; Thierfelder et al., 2010), respectivamente, probablemente porque la Da y la Ks fueron más adecuadas en la agricultura tradicional (Mutsamba et al., 2020; Nyamangara et al., 2014), las cuales concuerdan con los datos obtenidos en este estudio (Figuras 6 y 7). Sin embargo, el rendimiento de grano de maíz no mostró diferencia significativa entre la agricultura de conservación y la tradicional (Bai et al., 2022). Por otro lado, el rendimiento de grano de maíz (Pagani et al., 2012) y otros cultivos (Stevens et al., 2005) no mostraron diferencia significativa al aplicar cal agrícola y dolomita, probablemente porque el tiempo de reacción de la dolomita en el suelo fue mucho mayor que en este estudio. Además, la mayor producción de maíz de forraje verde por efecto de la cal

podría ser por su mayor solubilidad que la dolomita (Nogaroli et al., 2020; Stevens et al., 2005; Tiritan et al., 2016).

Tabla 4. Promedios \pm error estándar de la biometría y rendimiento del maíz forrajero con diferentes sistemas de labranza, encalado y sistemas de labranza x encalado.

| Factores | Altura (cm) | IAF | FV | FS |
|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | | | (t/ha) | |
| Sistemas de labranza (SL) | | | | |
| AC | 1,92 \pm 0,04 b | 4,01 \pm 0,19 a | 53,01 \pm 1,50 b | 16,98 \pm 0,41 b |
| AT | 1,95 \pm 0,03 a | 4,08 \pm 0,23 a | 59,46 \pm 1,78 a | 17,66 \pm 0,59 a |
| Encalado (E) | | | | |
| T | 1,92 \pm 0,03 a | 3,58 \pm 0,18 b | 55,45 \pm 2,26 b | 16,81 \pm 0,31 b |
| C | 1,91 \pm 0,02 a | 4,72 \pm 0,26 a | 60,30 \pm 2,23 a | 18,72 \pm 0,80 a |
| D | 1,98 \pm 0,05 a | 3,85 \pm 0,24 b | 52,95 \pm 1,77 b | 16,41 \pm 0,31 b |
| SL x E | | | | |
| ACxT | 1,91 \pm 0,04 b | 3,42 \pm 0,23 b | 51,15 \pm 1,34 a | 16,48 \pm 0,52 b |
| ACxC | 1,87 \pm 0,03 b | 4,28 \pm 0,29 b | 57,14 \pm 2,87 a | 17,72 \pm 1,02 b |
| ACxD | 1,98 \pm 0,10 b | 4,34 \pm 0,36 b | 50,75 \pm 2,47 a | 16,36 \pm 0,47 b |
| ATxT | 1,93 \pm 0,05 a | 3,74 \pm 0,28 b | 59,76 \pm 3,10 a | 16,78 \pm 0,44 b |
| ATxC | 1,94 \pm 0,01 a | 5,16 \pm 0,37 a | 63,47 \pm 2,87 a | 19,72 \pm 1,12 a |
| ATxD | 1,98 \pm 0,05 a | 3,35 \pm 0,19 b | 55,14 \pm 2,29 a | 16,47 \pm 0,49 b |

AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; C: cal; D: dolomita; IAF: índice de área foliar; FV: forraje verde; FS: forraje seco; a – e: letras minúsculas diferentes en una columna indica diferencia significativa entre los sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza x encalado, de acuerdo a la prueba de comparación DGC ($p < 0.05$).

La correlación entre el índice de área foliar (IAF) con el forraje seco y el contenido de N foliar fue positiva ($r = 0,52$ y $0,69$, respectivamente), porque al incrementar el N foliar consecuentemente incrementó el IAF (Tabla 2) y a mayor IAF, el forraje seco incrementó, siendo congruente con el estudio de (Tian et al., 2020).

El rendimiento de forraje verde mostró una correlación positiva con el forraje seco y el contenido de Ca foliar, $r = 0,64$ y $0,45$, respectivamente, porque el forraje seco es derivado del forraje verde; y porque el aumento del Ca, a partir de la cal, incrementó el forraje verde (Tabla 2), concordando con un aumento de $35,2\%$ de forraje al aplicar $0,06\%$ de calcio (do Moraes Gatti et al., 2023). Además, el forraje seco mostró una correlación positiva con el N y Ca, $r = 0,47$ y $0,55$, respectivamente, debido a que el forraje seco incrementó significativamente ($p < 0,05$) con el aumento significativo del N y del Ca (Tabla 2).

Tabla 5. Promedios \pm error estándar de los nutrientes foliares del forraje bajo sistemas de labranza, encalado y sistemas de labranza x encalado.

| Factores | N | P | K | Ca | Mg |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | (g/kg) | | | | |
| Sistemas de labranza (SL) | | | | | |
| AC | 52,79 \pm 1,14 a | 2,27 \pm 0,07 b | 21,67 \pm 0,67 a | 6,23 \pm 0,28 b | 1,03 \pm 0,03 b |
| AT | 50,18 \pm 1,66 b | 2,18 \pm 0,06 a | 21,31 \pm 0,28 b | 8,03 \pm 0,47 a | 1,52 \pm 0,06 a |
| Encalado (E) | | | | | |
| T | 49,01 \pm 1,33 b | 1,99 \pm 0,04 b | 22,18 \pm 0,43 a | 6,19 \pm 0,11 b | 1,19 \pm 0,08 a |
| C | 56,24 \pm 1,19 a | 2,11 \pm 0,05 b | 19,89 \pm 0,46 b | 8,13 \pm 0,68 a | 1,35 \pm 0,12 a |
| D | 49,21 \pm 1,49 b | 2,43 \pm 0,06 a | 22,40 \pm 0,57 a | 7,08 \pm 0,55 b | 1,29 \pm 0,12 a |
| SL x E | | | | | |
| ACxT | 49,93 \pm 2,18 b | 2,00 \pm 0,08 b | 22,48 \pm 0,48 b | 6,18 \pm 0,18 b | 1,00 \pm 0,04 b |
| ACxC | 59,68 \pm 2,26 a | 2,08 \pm 0,08 b | 18,80 \pm 0,25 c | 6,70 \pm 0,79 b | 1,08 \pm 0,05 b |
| ACxD | 53,53 \pm 1,42 b | 2,43 \pm 0,12 a | 23,73 \pm 0,58 a | 5,80 \pm 0,24 b | 1,03 \pm 0,09 b |
| ATxT | 54,43 \pm 2,78 b | 1,98 \pm 0,05 b | 21,88 \pm 0,76 b | 6,20 \pm 0,16 b | 1,38 \pm 0,08 a |
| ATxC | 58,40 \pm 1,94 a | 2,15 \pm 0,06 b | 20,98 \pm 0,35 b | 9,55 \pm 0,45 a | 1,63 \pm 0,12 a |
| ATxD | 47,30 \pm 2,28 b | 2,43 \pm 0,08 a | 21,08 \pm 0,15 b | 8,35 \pm 0,51 a | 1,55 \pm 0,10 a |

AC: agricultura de conservación; AT: agricultura tradicional; T: testigo; C: cal; D: dolomita; a – e: letras minúsculas diferentes en una columna indica diferencia significativa entre los sistemas de labranza, encalado, y sistemas de labranza x encalado, de acuerdo a la prueba de comparación DGC ($p < 0,05$).

4.4.2. N, P, K, Ca y Mg foliar

La concentración de nutrientes foliares cambió significativamente ($p < 0,05$) por el factor sistema de labranza. La agricultura de conservación mostró 2,61 y 0,49 g/kg de N y K foliar, respectivamente, más que la agricultura tradicional. Mientras, esta reportó 0,09, 1,8 y 0,49 g/kg de P, Ca y Mg foliar, respectivamente, más que la agricultura de conservación (Tabla 2).

El factor encalado reportó diferencia estadística significativa ($p < 0,05$) sobre la concentración de nutrientes foliares, con excepción del Mg (Tabla 2). La cal agrícola mostró el mayor contenido de N y Ca foliar que la dolomita en 7,03 y 1,05 g/kg, respectivamente. Sin embargo, el contenido de K foliar disminuyó 2,29 y 2,51 g/kg comparado con el testigo y la dolomita, respectivamente. La dolomita incrementó en 0,44 y 0,32 g/kg el contenido foliar de P, en comparación al testigo y a la cal, respectivamente. Además, la interacción del sistema de labranza x encalantes mostró diferencia significativa sobre la concentración de nutrientes foliares ($p < 0,05$). La interacción cal x sistemas de labranza mostró la mayor concentración de N foliar. El P foliar mostró las mayores concentraciones con las interacciones de la dolomita con la agricultura de conservación, y con la tradicional; y el K mostró mayor concentración con dolomita x agricultura de conservación. Mientras, las

interacciones agricultura tradicional x control y encalantes mostraron las mayores concentraciones foliares de Ca y Mg (Tabla 2).

Los sistemas de labranza y la aplicación de encalantes influyen en la absorción de algunos nutrientes por las plantas, según (Ndayisaba et al., 2021; Tiritan et al., 2016), respectivamente. El N foliar fue significativamente mayor en la agricultura de conservación (Tabla 2), probablemente debido al aporte de N al suelo por la cobertura vegetal de *Desmodium* sp. Análogamente, con una cobertura de *Desmodium* sp, el N del suelo incrementó de $4,5 \pm 0,1$ a $6,3 \pm 0,8$ mg/kg, aumentando la disponibilidad para la absorción y contenido de N foliar (Naeem et al., 2023). La agricultura tradicional mostró significativamente mayor concentración foliar de P, Ca y Mg ($p < 0,05$), probablemente porque la labranza en la agricultura tradicional suministra hasta un 98 % más oxígeno que la agricultura de conservación (Topp et al., 2018) y las absorciones y contenidos foliares de dichos elementos podrían incrementar hasta un 63 % (Fuentes et al., 2004). Sin embargo, en un estudio semejante, las concentraciones foliares de P en maíz fueron 2,2 y 2,1 g/kg en la agricultura tradicional y la de conservación, respectivamente, sin mostrar diferencia significativa, al igual que el Mg (Tiritan et al., 2016). Además, la aplicación de cal agrícola tuvo efecto análogo a un estudio semejante (Naeem et al., 2023), el K foliar disminuyó un 32 %, el Ca incrementó un 65 % y el Mg foliar en maíz no fue significativo.

V. CONCLUSIONES

1. La comparación de las propiedades físicas, químicas, biológicas del suelo, contenido de nutrientes, biometría y rendimiento del maíz forrajero INIA 616 bajo los sistemas de labranza y el encalado mostraron respuestas significativas.
2. La agricultura de conservación emitió menor CO₂ del suelo, tuvo mayor humedad del suelo y cantidad de lombrices que el suelo en la agricultura tradicional.
3. La agricultura tradicional mostró una conductividad hidráulica, densidad aparente más adecuada, mayor índice de área foliar y rendimiento de forraje con mayor concentración foliar de P, Ca y Mg que la agricultura de conservación.
4. La cal disminuyó el porcentaje de Al del suelo con mayor eficiencia que la dolomita. Además, dichos encalantes incrementaron el pH, contenido de Ca del suelo, y sus relaciones catiónicas relacionadas directamente a este elemento.
5. La cal agrícola y las prácticas de la agricultura tradicional incrementaron el rendimiento de forraje verde y seco más que la dolomita y la agricultura de conservación, respectivamente.
6. Las concentraciones foliares de N y K mostraron mayor concentración bajo las prácticas de la agricultura de conservación que la tradicional. Mientras que el P, Ca y Mg foliar fueron mayores en la agricultura tradicional que la de conservación.
7. Estos resultados demostraron que la agricultura de conservación tiene el potencial de disminuir las emisiones de CO₂ del suelo y mejorar algunas propiedades del suelo con un rendimiento de forraje de maíz ligeramente menor que la agricultura tradicional; y la cal mejoró las propiedades químicas del suelo ácido más rápido que la dolomita, y con mayor rendimiento del maíz forrajero que la dolomita. Por lo que la aplicación de los principios de la agricultura de conservación y el uso de la cal es muy promisorio en suelos ácidos.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. La comparación de los sistemas de labranzas debe involucrar, además, el análisis de agregados estables, espacio poroso, carbono lábil, materia orgánica y erosión del suelo, a través de tiempo. con diferentes cultivos, porque la mejora de las propiedades del suelo y los rendimientos de los cultivos en la transición a la agricultura de conservación es paulatina.
2. Además, los encalantes deben ser analizados a nivel de laboratorio para determinar la emisión de CO₂ con diferentes encalantes, no sólo carbonatados, sino silicatados.

VII. REFERENCIAS

- Achung, F. R. (1995). *El recurso del suelo en la Amazonía peruana, diagnóstico para su investigación*. IIAP.
- Alam, M. K., Bell, R. W., Haque, M. E., & Kader, M. A. (2018). Minimal soil disturbance and increased residue retention increase soil carbon in rice-based cropping systems on the Eastern Gangetic Plain. *Soil and Tillage Research*, 183, 28–41. doi: 10.1016/j.still.2018.05.009
- Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C., López, M. V., & Arrúe, J. L. (2007). Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 96(1–2), 331–341. doi: 10.1016/j.still.2007.08.003
- Álvaro-Fuentes, Jorge, Lóczy, D., Thiele-Bruhn, S., & Zornoza, R. (2019). *Handbook of plant and soil analysis for agricultural systems. Diversification and low-input farming across Europe: from practitioners' engagement and ecosystems services to increased revenues and value chain organisation*. Diverfarming.
- Martínez-Gamiño, M., Salvador, E., Ceja, O., & Espinosa Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 765-778.
- Bai, L., Kong, X., Li, H., Zhu, H., Wang, C., & Ma, S. (2022). Effects of Conservation Tillage on Soil Properties and Maize Yield in Karst Regions, Southwest China. *Agriculture*, 12(9). doi: 10.3390/agriculture12091449
- Ball, B. C., Scott, A., & Parker, J. P. (1999). Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and tillage Research*, 53(1), 29-39.
- Bauer, P. J., Frederick, J. R., Novak, J. M., & Hunt, P. G. (2006). Soil CO₂ flux from a norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 90(1–2), 205–211. doi: 10.1016/j.still.2005.09.003
- Bilandija, D., Zgorelec, Aeljka, & Kisi}, I. (2014). The Influence of Agroclimatic Factors on Soil CO₂ Emissions. *Collegium Antropologicum*, 38, 134-149.
- Bilgili, A. V., Yilmaz, G., & Ikinci, A. (2013). Modeling temporal variability of soil CO₂ emissions from an apple orchard in the harran plain of southeastern Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(6), 744–761. doi: 10.3906/tar-1211-63
- Birkás, M., Jolánkai, M., Gyuricza, C., & Percze, A. (2004). Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary. *Soil and Tillage Research*, 78(2), 185–196. doi: 10.1016/j.still.2004.02.006

- Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Giloe, C., Pashanasf, B., Lavelle, P., & Brussaard, L. (1999). Effects of Earthworms on Soil Structure and Physical Properties. *Earthworm Management in Tropical Ecosystems*, 5: 149-171.
- Blanco-Moure, N., Moret-Fernández, D., & López, M. V. (2012). Dynamics of aggregate destabilization by water in soils under long-term conservation tillage in semiarid Spain. *Catena*, 99, 34–41. doi: 10.1016/j.catena.2012.07.010
- Boonchamni, C., Boonthai Iwai, C., & Ta-Oun, M. (2019). Physical-Chemical Properties of Earthworm Casts in Different Earthworm Species. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 1, 10-19.
- Caires, E. F., Alleoni, L. R. F., Cambri, M. A., & Barth, G. (2005). Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agronomy Journal*, 97(3), 791–798. doi: 10.2134/agronj2004.0207
- Carbonell-Bojollo, R., Veroz-Gonzalez, O., Ordoñez-Fernandez, R., Moreno-Garcia, M., Basch, G., Kassam, A., de Torres, M. A. R. R., & Gonzalez-Sanchez, E. J. (2019). The effect of conservation agriculture and environmental factors on CO₂ emissions in a rainfed crop rotation. *Sustainability*, 11(14). doi: 10.3390/su11143955
- Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V. H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I. F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Tavira, S. (2022). Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Agronomy* 6, 1-18. doi: 10.3390/soilsystems6040087
- Celis-Tarazona, R., Florida-Rofner, N., & Rengifo-Rojas, A. (2020). Impacto sobre indicadores físicos y químicos del suelo con manejo convencional de coca y cacao. *Ciencia Unemi*, 13(33), 1–9. doi: 10.29076/issn.2528-7737vol13iss33.2020pp1-9p
- Cerdà, A., Rodrigo-Comino, J., Yakupoğlu, T., Dindaroğlu, T., Terol, E., Mora-Navarro, G., Arabameri, A., Radziemska, M., Novara, A., Kavian, A., Vaverková, M. D., Abd-Elmabod, S. K., Hammad, H. M., & Daliakopoulos, I. N. (2020). Tillage versus no-tillage. soil properties and hydrology in an organic persimmon farm in eastern Iberian Peninsula. *Water*, 12(6). doi: 10.3390/W12061539
- Crusciol, C. A. C., Marques, R. R., Carneis Filho, A. C. A., Soratto, R. P., Costa, C. H. M., Ferrari Neto, J., Castro, G. S. A., Pariz, C. M., Castilhos, A. M., & Franzluebbers, A. J. (2019). Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(3), 347–372. doi: 10.1007/s10705-019-10017-0
- da Veiga, M., José Reinert, D., Miguel Reichert, J., & Rodrigo Kaiser, D. (2008). short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a

- southern brazilian hapludox resumo: propriedades físicas de um nitossolo vermelho após curto e longo prazo de aplicação de sistemas de preparo e de fontes de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1437- 1446.
- Dalla Nora, D., Amado, T. J. C., Nicoloso, R. da S., & Gruhn, E. M. (2017). Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till oxisol. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 41. doi: 10.1590/18069657rbc20160504
- Dang, Y. P., Seymour, N. P., Walker, S. R., Bell, M. J., & Freebairn, D. M. (2015). Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grains-growing regions: I. Drivers and implementation. *Soil and Tillage Research*, 152,104–114. doi: 10.1016/j.still.2015.03.009
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Hongwen, L. (2010). Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), 1–25. doi: 10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025
- Díaz Durán, Ochoa Carlos, Álvarez Jhon, & Rincón Numpaque. (2022). Toxicidad por aluminio como limitante del crecimiento y la productividad: experiencias en diagnóstico y manejo en palmeras de Yarima (Santander). *Revista Palmas*, 43(1), 102 - 116
- do Moraes Gatti, V. C., da Silva Barata, H., Silva, V. F. A., da Cunha, F. F., de Oliveira, R. A., de Oliveira, J. T., & Silva, P. A. (2023). Influence of Calcium on the Development of Corn Plants Grown in Hydroponics. *AgriEngineering*, 5(1), 623–630. doi: 10.3390/agriengineering5010039
- Duiker, S. W., & Beegle, D. B. (2006). Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. *Soil and Tillage Research*, 88(1–2), 30–41. doi: 10.1016/j.still.2005.04.004
- Enesi, R. O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M. S., Fan, X., Strelkov, S., & Gorim, L. Y. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability - a meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5, 14-27. doi: 10.3389/fagro.2023.1194896
- FAO. (2012). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: la gestión de los sistemas en situación de riesgo*. Mundi-Prensa, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Mundi-Prensa.
- GORU (Gobierno Regional de Ucayali). 2023. Plan de Desarrollo Concertado de Ucayali 2023 – 2033: Pucallpa, Perú, pp 234 – 236

- Farhate, C. V. V., de Souza, Z. M., La Scala, N., de Sousa, A. C. M., Santos, A. P. G., & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil tillage and cover crop on soil CO₂ emissions from sugarcane fields. *Soil Use and Management*, 35(2), 273–282. doi: 10.1111/sum.12479
- Fuentes, J. P., Flury, M., & Bezdicek, D. F. (2004). Hydraulic Properties in a Silt Loam Soil under Natural Prairie, Conventional Till, and No-Till. *Soil Science Society of America Journal*, 68(5), 1679–1688. doi: 10.2136/sssaj2004.1679
- Gao, W., Hodgkinson, L., Jin, K., Watts, C. W., Ashton, R. W., Shen, J., Ren, T., Dodd, I. C., Binley, A., Phillips, A. L., Hedden, P., Hawkesford, M. J., & Whalley, W. R. (2016). Deep roots and soil structure. *Plant Cell and Environment*, 39(8), 1662–1668. doi: 10.1111/pce.12684
- Gazey, C., & Davies, S. (2009). *Soil acidity A guide for WA farmers and consultants*. DAF.
- Guan, D., Al-Kaisi, M. M., Zhang, Y., Duan, L., Tan, W., Zhang, M., & Li, Z. (2014). Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. *Field Crops Research*, 157, 89–97. doi: 10.1016/j.fcr.2013.12.015
- Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., Sakaki, T., Nishimura, T., & Komatsu, T. (2016). Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters. *Soils and Foundations*, 56(4), 676–690. doi: 10.1016/j.sandf.2016.07.008
- Han, K., Liu, B., Liu, P., & Wang, Z. (2020). The optimal plant density of maize for dairy cow forage production. *Agronomy Journal*, 112(3), 1849–1861. doi: 10.1002/agj2.20004
- Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 363, Issue 1491, pp. 543–555). Royal Society. doi: 10.1098/rstb.2007.2169
- Hobson, D., Harty, M., Tracy, S. R., & McDonnell, K. (2022). The effect of tillage depth and traffic management on soil properties and root development during two growth stages of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Soil*, 8(1), 391–408. doi: 10.5194/soil-8-391-2022
- Hu, W., Shao, M., Wang, Q., Fan, J., & Horton, R. (2009). Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, 149(3–4), 355–366. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.12.016
- Iglesias, S., Alegre, J., Salas, C., & Egüez, J. (2018). Corn yield (*Zea mays* L.) improves with the use of eucalyptus biochar. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 25–32. doi: 10.17268/sci.agropecu.2018.01.03

- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C., & Li, X. (2022). Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 45-63. doi: 10.3389/fpls.2022.802274
- Jayaraman, S., Sahu, M., Sinha, N. K., Mohanty, M., Chaudhary, R. S., Yadav, B., Srivastava, L. K., Hati, K. M., Patra, A. K., & Dalal, R. C. (2022). Conservation Agricultural Practices Impact on Soil Organic Carbon, Soil Aggregation and Greenhouse Gas Emission in a Vertisol. *Agriculture*, *12*(7). doi: 10.3390/agriculture12071004
- Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2022a). State of the global adoption and spread of Conservation Agriculture. *Agronomy*, *34*. 1–14. doi: 10.19103/as.2021.0088.01
- Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2022b). Successful Experiences and Lessons from Conservation Agriculture Worldwide. *Agronomy*, *12*, 49-65. doi: 10.3390/agronomy12040769
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., & Pretty, J. (2009). The spread of conservation agriculture: Justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability*, *7*(4), 292–320. doi: 10.3763/ijas.2009.0477
- Knowles, T. A., & Singh, B. (2003). Carbon storage in cotton soils of northern New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, *41*(5), 889–903. doi: 10.1071/SR02023
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N., & Muto, Y. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, *143*, 172–179. doi: 10.1016/j.still.2014.02.006
- La Scala, N., Bolonhezi, D., & Pereira, G. T. (2006). Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Water Pollution*, *91*(1–2), 244–248. doi: 10.1016/j.still.2005.11.012
- Lal, R., Reicosky, D. C., & Hanson, J. D. (2007). Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, *93* (1), 1–12. doi: 10.1016/j.still.2006.11.004
- Lemtiri, A., Colinet, G., Alabi, T., Cluzeau, D., Zirbes, L., Haubruge, É., & Francis, F. (2014). Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. *Biotechnology. Agronomy. Social. Environment*, *18*, 1-13.
- Limousin, G., & Tessier, D. (2007). Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil and Tillage Research*, *92*(1–2), 167–174. doi: 10.1016/j.still.2006.02.003

- Mahmud, M. S., & Chong, K. P. (2022). Effects of Liming on Soil Properties and Its Roles in Increasing the Productivity and Profitability of the Oil Palm Industry in Malaysia. In *Agriculture*, 12, 3. doi: 10.3390/agriculture12030322
- Marcelino, S., & Yanqui, V. (2014). Recuperación de terrenos degradados por el cultivo de coca (*Erythroxylon coca*) En VRAEM, Perú, con aplicación de Tecnología Agroforestal Recovery of degraded land for coca cultivation (*Erythroxylon coca*) In VRAEM, Perú, with application of Agroforestry Technology. *Acta Nova*, 6, 23-34.
- Marschner, P. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition*. Elsevier.
- McInga, S., Muzangwa, L., Janhi, K., & Mnkeni, P. N. S. (2020). Conservation agriculture practices can improve earthworm species richness and abundance in the semi-arid climate of Eastern Cape, South Africa. *Agriculture*, 10(12), 1–12. doi: 10.3390/agriculture10120576
- Miguel Reichert, J., Duardo Ak iyoshi Sanches Suzuki, L. E., & José Reinert, D. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos Ciencia Solo*, 5, 34-42
- Mloza-Banda, H. R., Makwiza, C. N., & Mloza-Banda, M. L. (2016). Soil properties after conversion to conservation agriculture from ridge tillage in Southern Malawi. *Journal of Arid Environments*, 127, 7–16. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.11.001
- Monneveux, P., Quilléro, E., Sanchez, C., & Lopez-Cesati, J. (2006). Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment. *Plant and Soil*, 279(1–2), 95–105. doi: 10.1007/s11104-005-0436-3
- Morais, E. G. de, Jindo, K., & Silva, C. A. (2023). Biochar-Based Phosphate Fertilizers: Synthesis, Properties, Kinetics of P Release and Recommendation for Crops Grown in Oxisols. *Agronomy*, 13(2). doi: 10.3390/agronomy13020326
- Mühlbachová, G., Kusá, H., Růžek, P., & Vavera, R. (2022). CO₂ emissions in a soil under different tillage practices. *Plant, Soil and Environment*, 68(6), 253–261. doi: 10.17221/110/2022-PSE
- Muoni, T., Mhlanga, B., Forkman, J., Sitali, M., & Thierfelder, C. (2019). Tillage and crop rotations enhance populations of earthworms, termites, dung beetles and centipedes: Evidence from a long-term trial in Zambia. *Journal of Agricultural Science*, 157(6), 504–514. doi: 10.1017/S002185961900073X
- Mutsamba, E. F., Nyagumbo, I., & Mupangwa, W. (2020). Forage and maize yields in mixed crop-livestock farming systems: Enhancing forage and maize yields in mixed crop-

- livestock systems under conservation agriculture in sub-humid Zimbabwe. *Wageningen Journal of Life Sciences*, 92. doi: 10.1016/j.njas.2019.100317
- Naeem, A., Deppermann, P., & Mühling, K. H. (2023). Ammonium Fertilization Enhances Nutrient Uptake, Specifically Manganese and Zinc, and Growth of Maize in Unlimed and Limed Acidic Sandy Soil. *Nitrogen*, 4(2), 239–252. doi: 10.3390/nitrogen4020017
- Ndayisaba, P. C., Kuyah, S., Midega, C. A. O., Mwangi, P. N., & Khan, Z. R. (2021). Intercropping desmodium and maize improves nitrogen and phosphorus availability and performance of maize in Kenya. *Field Crops Research*, 263. doi: 10.1016/j.fcr.2021.108067
- Nemček -Korenkova, L., & Urík, M. (2012). Soil moisture and its effect on bulk density and porosity of intact aggregates of three Mollic soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 82, 172-185.
- Nogaroli, J. A., & da Fonseca, A. F. (2020). Yield index of crops grown under no-tillage after superficial application of micronized liming materials (MLM) on the soil. *Australian Journal of Crop Science*, 14(1), 187–195. doi: 10.21475/ajcs.20.14.01.p2199
- Nurul Aini, S., Yusnaini, S., & Niswati, A. (2019). Minimum Tillage and in situ Mulch Increasing the Population and Biomass of Earthworms Under Mung Bean Cultivation on Ultisol Soil. *Journal Tropical Soils*, 24(3), 141–148. doi: 10.5400/jts.2019.v24i3.141
- Nyamangara, J., Marondedze, A., Masvaya, E. N., Mawodza, T., Nyawasha, R., Nyengerai, K., Tirivavi, R., Nyamugafata, P., & Wuta, M. (2014). Influence of basin-based conservation agriculture on selected soil quality parameters under smallholder farming in Zimbabwe. *Soil Use and Management*, 30(4), 550–559. doi: 10.1111/sum.12149
- Nyambo, P., Chiduza, C., & Araya, T. (2022). Effect of conservation agriculture on selected soil physical properties on a haplic cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(2), 195–208. doi: 10.1080/03650340.2020.1828578
- Pagani, A., & Mallarino, A. P. (2012). Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1877–1886. doi: 10.2136/sssaj2012.0119
- Page, K., Dang, Y., & Dalal, R. (2013). Impacts of conservation tillage on soil quality, including soil-borne crop diseases, with a focus on semi-arid grain cropping systems. *Australasian Plant Pathology*, 42(3), 363–377. doi: 10.1007/s13313-013-0198

- Petito, M., Cantalamessa, S., Pagnani, G., Degiorgio, F., Parisse, B., & Pisante, M. (2022). Impact of Conservation Agriculture on Soil Erosion in the Annual Cropland of the Apulia Region (Southern Italy) Based on the RUSLE-GIS-GEE Framework. *Agronomy*, *12*(2). doi: 10.3390/agronomy12020281
- Pires, L. F., Borges, J. A. R., Rosa, J. A., Cooper, M., Heck, R. J., Passoni, S., & Roque, W. L. (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *165*, 66–79. doi: 10.1016/j.still.2016.07.010
- Pisante, M., Stagnari, F., Grandi, M., Elias, G., Santilocchi, R., & Tabaglio, V. (2011). *Agricoltura BLU la via italiana dell'agricoltura conservativa Manuale abbreviato*. Giservice.
- Pulleman, M., Jongmans, A., Marinissen, J., & Bouma, J. (2003). Effects of organic versus conventional arable farming on soil structure and organic matter dynamics in a marine loam in the Netherlands. *Soil Use and Management*, *19*(2), 157–165. doi: 10.1079/sum2003186
- Rahman, M. A., Lee, S. H., Ji, H. C., Kabir, A. H., Jones, C. S., & Lee, K. W. (2018). Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: Current status and opportunities. *Journal of Molecular Sciences*, *19*, 10-24. doi: 10.3390/ijms19103073
- MIDAGRI. (2022). Elaboración Del Mapa de Suelos y Clasificación de Tierras Por Su Capacidad de Uso Mayor Del Departamento de Ucayali En El Marco Del Proceso de Zonificación Forestal. RDG 0656-2022-MIDAGRI-DVDAFIR-DGAAA. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/3638855-656-2022-midagri-dvdafir-dgaaa>
- Rheinheimer, D. S., Santos, E. J. S., Kaminski, J., & Bortoluzzi, E. C. (2000). Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *24*, 797-805.
- Rochette, P. (2008). No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research*, *101*(1–2), 97–100. doi: 10.1016/j.still.2008.07.011
- Sá, J. C. de M., Cerri, C. C., Lal, R., Dick, W. A., de Cassia Piccolo, M., & Feigl, B. E. (2009). Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*, *104*(1), 56–64. doi: 10.1016/j.still.2008.11.007

- Sartori, F., Piccoli, I., Polese, R., & Berti, A. (2022). Transition to conservation agriculture: How tillage intensity and covering affect soil physical parameters. *Soil*, 8(1), 213–222. doi: 10.5194/soil-8-213-2022
- Shaaban, M., Wu, Y., Wu, L., Hu, R., Younas, A., Nunez-Delgado, A., Xu, P., Sun, Z., Lin, S., Xu, X., & Jiang, Y. (2020). The effects of pH change through liming on soil N₂O emissions. *Processes*, 8(6), 1–13. doi: 10.3390/pr8060702
- Silva-Olaya, A. M., Cerri, C. E. P., La Scala, N., Dias, C. T. S., & Cerri, C. C. (2013). Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, 8(1). doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015014
- Singh, S., Sharma, A., Khajuria, K., Singh, J., & Vig, A. P. (2020). Soil properties changes earthworm diversity indices in different agro-ecosystem. *BMC Ecology*, 20(1). doi: 10.1186/s12898-020-00296-5
- Sithole, N. J., Magwaza, L. S., & Thibaud, G. R. (2019). Long-term impact of no-till conservation agriculture and N-fertilizer on soil aggregate stability, infiltration and distribution of C in different size fractions. *Soil and Tillage Research*, 190, 147–156. doi: 10.1016/j.still.2019.03.004
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79, 7–31. doi: 10.1016/j.still.2004.03.008
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66–87. doi: 10.1016/j.still.2011.10.015
- Stevens, G., Gladbach, T., Motavalli, P., Dunn, D., & Stevens, G. (2005). Soil calcium: magnesium ratios and lime recommendation for cotton. *Journal of Cotton Science*, 9, 65 - 71.
- Thierfelder, C., & Wall, P. C. (2010). Rotation in conservation agriculture systems of Zambia: Effects on soil quality and water relations. *Experimental Agriculture*, 46(3), 309–325. doi: 10.1017/S001447971000030X
- Tian, G., Qi, D., Zhu, J., & Xu, Y. (2020). Effects of nitrogen fertilizer rates and waterlogging on leaf physiological characteristics and grain yield of maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1–13. doi: 10.1080/03650340.2020.1791830
- Tiritan, C. S., Büll, L. T., Crusciol, C. A. C., Carmeis Filho, A. C. A., Fernandes, D. M., & Nascente, A. S. (2016). Tillage system and lime application in a tropical region: Soil

- chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. *Soil and Tillage Research*, 155, 437–447. doi: 10.1016/j.still.2015.06.012
- Topp, G. C., Dow, B., Edwards, M., Gregorich, E. G., Curnoe, W. E., Cook, F. J., Gregorich, M., Curnoe, E. G., Cook, W. E., Grwegorich, M., & Et Cook, W. E. (2018). *Oxygen measurements in the root zone facilitated by TDR. Canadian Journal of Soil Sciences*, 80, 33-41
- Toufееq, S., Dhalin, D., Khatawkar, D. S., & Subhagan, S. R. (2020). Effect of Tillage Methods on CO₂ Emission from Red Loam Soil of Kerala. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(4), 2827–2837. doi: 10.20546/ijcmas.2020.904.331
- Van Capelle, C., Schrader, S., & Brunotte, J. (2012). Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota - A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology*, 50, 165–181. doi: 10.1016/j.ejsobi.2012.02.005
- Vieira, M.K., V., Tormena, A., Soares, P., Filho, V., Carlos, A., Gonçalves, A., & Da Costa, S. (2006). Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico seção vi-manejo e conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 125-139.
- Vizioli, B., Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Tormena, C. A., & Barth, G. (2021). Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, 209. doi: 10.1016/j.still.2021.104935

ANEXOS



Figura 8. Acondicionamiento de la parcela experimental. (A) Corte del *Desmodium* sp. (B) Aplicación de encalantes.



Figura 9. Metodología de captura de CO_2 del suelo. (A) Disposición de trampas de CO_2 en las unidades experimentales. (B) Recojo y reposición de NaOH en campo. (C) Titulación ácido – base.



Figura 10. Proceso del cultivo. (A) Siembra de maíz. (B) Fumigación contra gusanos de tierra. (C) Periodo vegetativo del maíz.



Figura 11. Determinación de algunas variables. (A) Conductividad hidráulica. (B) Humedad del suelo y densidad aparente. (C) Rendimiento del forraje verde

Tabla 6. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 3° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,08 | 11 | 0,01 | 21,06 | < 0,0001 |
| Bloques | 5,7E-04 | 3 | 1,9E-04 | 1,31 | 0,4154 |
| Sist. lab. (SL) | 0,08 | 1 | 0,08 | 565,38 | 0,0002 |
| Error A | 4,3E-04 | 3 | 1,4E-04 | 0,39 | 0,7597 |
| Encalado (E) | 1,9 E-03 | 2 | 9,3E-04 | 2,53 | 0,0698 |
| SL x E | 4,1 E-04 | 2 | 2,0E-04 | 0,56 | |
| Error B | 4,1E-03 | 12 | 3,0E-04 | | |
| Total | 0,09 | 23 | | | |

Tabla 7. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 6° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,01 | 11 | 8,0E-03 | 8,47 | 0,0004 |
| Bloques | 6,7E-05 | 3 | 2,2E-05 | 0,33 | 0,8045 |
| SL | 0,01 | 1 | 0,01 | 121 | 0,0016 |
| Error A | 2,0E-04 | 3 | 6,7E-05 | 0,71 | 0,5667 |
| E | 5,8 E-05 | 2 | 2,9E-05 | 0,31 | 0,7400 |
| SL x E | 4,1 E-04 | 2 | 2,0E-04 | 2,16 | 0,1578 |
| Error B | 1,1E - 03 | 12 | 9,4E-05 | | |
| Total | 0,01 | 23 | | | |

Tabla 8. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 10° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,01 | 11 | 1,0E-03 | 089 | 0,5740 |
| Bloques | 4,5E-04 | 3 | 1,5E-04 | 0,14 | 0,9329 |
| SL | 0,00 | 1 | 0,00 | 0,00 | 0,9999 |
| Error A | 3,3E-03 | 3 | 1,1E-03 | 0,97 | 0,4394 |
| E | 0,01 | 2 | 2,9E-03 | 2,51 | 0,1229 |
| Sl x E | 1,7E-03 | 2 | 8,4E-04 | 0,73 | 0,5021 |
| Error B | 0,01 | 12 | 1,1E-03 | | |
| Total | 0,02 | 23 | | | |

Tabla 9. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 14° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 2,8E-03 | 11 | 2,6E-04 | 6,90 | 0,0012 |
| Bloques | 1,8E-04 | 3 | 6,0E-05 | 3,91 | 0,1462 |
| SL | 2,2E-03 | 1 | 2,2E-03 | 144,27 | 0,0012 |
| Error A | 4,6E-05 | 3 | 1,5E-05 | 0,41 | 0,7505 |
| E | 2,6E-04 | 2 | 1,3E-04 | 3,44 | 0,0657 |
| Sl x E | 1,6E-04 | 2 | 7,9E-05 | 2,11 | 0,1638 |
| Error B | 4,5E-04 | 12 | 3,8E-05 | | |
| Total | 3,3E-03 | 23 | | | |

Tabla 10. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 17° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 4,7E-03 | 11 | 4,3E-04 | 0,56 | 0,8233 |
| Bloques | 2,5E-04 | 3 | 8,2E-05 | 0,09 | 0,9590 |
| SL | 1,0E-04 | 1 | 1,0E-04 | 0,12 | 0,7538 |
| Error A | 2,6E-03 | 3 | 8,8E-04 | 1,16 | 0,3657 |
| E | 4,7E-04 | 2 | 2,4E-04 | 0,31 | 0,7377 |
| SL x E | 1,3E-03 | 2 | 6,3E-04 | 0,83 | 0,4610 |
| Error B | 0,01 | 12 | 7,6E-04 | | |
| Total | 0,01 | 23 | | | |

Tabla 11. Análisis de varianza de la emisión de CO₂ del suelo en el 21° día

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,05 | 11 | 4,2E-03 | 3,55 | 0,0195 |
| Bloques | 0,02 | 3 | 0,01 | 1,49 | 0,3749 |
| SL | 0,02 | 1 | 0,02 | 4,33 | 0,1289 |
| Error A | 0,01 | 3 | 3,6E-03 | 3,04 | 0,0704 |
| E | 7,0E04 | 2 | 3,5E-04 | 0,30 | 0,7482 |
| SL x E | 3,0E03 | 2 | 1,5E-03 | 1,29 | 0,3114 |
| Error B | 0,01 | 12 | 1,2E-03 | | |
| Total | 0,06 | 23 | | | |

Tabla 12. Análisis de varianza de la población de lombrices

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 1114,77 | 1 | 101,34 | 2,63 | < 0,0001 |
| Bloques | 5 | 3 | 1,67 | 0,12 | 0,9401 |
| SL | 1045,44 | 1 | 1045,44 | 7,61 | 0,003 |
| Error A | 40,41 | 3 | 13,47 | 4,34 | 0,0274 |
| E | 21,04 | 2 | 10,52 | 0,39 | 0,0682 |
| SL x E | 2,88 | 2 | 1,44 | 0,46 | 0,6396 |
| Error B | 37,27 | 12 | 3,11 | | |
| Total | 1152,04 | 23 | | | |

Tabla 13. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo a una profundidad de 0 – 10 cm

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,07 | 11 | 0,01 | 1,29 | 0,3331 |
| Bloques | 0,01 | 3 | 4,1E-03 | 0,84 | 0,5567 |
| SL | 0,02 | 1 | 0,02 | 3,39 | 0,1630 |
| Error A | 0,01 | 3 | 4,9E-03 | 1,04 | 0,4112 |
| Encalado | 0,01 | 2 | 4,8E-03 | 1,02 | 0,3914 |
| SL x E | 0,01 | 2 | 0,01 | 1,47 | 0,2688 |
| Error B | 0,06 | 12 | 4,7E-03 | | |
| Total | 0,11 | 23 | | | |

Tabla 14. Análisis de varianza de la densidad aparente del suelo a una profundidad de 10 - 20 cm

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,07 | 11 | 0,01 | 1,18 | 0,3889 |
| Bloques | 0,04 | 3 | 0,01 | 4,37 | 0,1286 |
| Sl | 6,0E-04 | 1 | 6,0E-04 | 0,18 | 0,7031 |
| Error A | 0,01 | 3 | 3,4E-03 | 0,59 | 0,6316 |
| E | 0,01 | 2 | 3,7E-03 | 0,64 | 0,5426 |
| Sl x E | 0,01 | 2 | 0,01 | 1,02 | 0,3903 |
| Error B | 0,07 | 12 | 0,01 | | |
| Total | 0,14 | 23 | | | |

Tabla 15. Análisis de varianza de la humedad del suelo de 0 – 10 cm a los 40 dds

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 55,46 | 11 | 5,04 | 0,64 | 0,7681 |
| Bloques | 23,90 | 3 | 7,97 | 2,61 | 0,2261 |
| SL | 5,91 | 1 | 5,91 | 1,93 | 0,2585 |
| Error A | 9,17 | 3 | 3,06 | 0,39 | 0,7649 |
| E | 8,95 | 2 | 4,48 | 0,57 | 0,5823 |
| Sl x E | 7,53 | 2 | 3,76 | 0,48 | 0,6326 |
| Error B | 94,93 | 12 | 7,91 | | |
| Total | 150,40 | 23 | | | |

Tabla 16. Análisis de varianza de la humedad del suelo de 10 - 20 cm a los 40 dds

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 49,92 | 11 | 4,54 | 1,66 | 0,1973 |
| Bloques | 30,69 | 3 | 10,23 | 2,01 | 0,2910 |
| SL | 0,19 | 1 | 0,19 | 0,04 | 0,8603 |
| Error A | 15,30 | 3 | 5,10 | 1,87 | 0,1884 |
| Encalado | 2,00 | 2 | 1,00 | 0,37 | 0,7002 |
| SL x E | 1,73 | 2 | 0,87 | 0,32 | 0,7337 |
| Error B | 32,72 | 12 | 2,37 | | |
| Total | 82,64 | 23 | | | |

Tabla 17. Análisis de varianza de la humedad del suelo de 0 – 10 cm a los 83 dds

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 64,39 | 11 | 5,85 | 3,06 | 0,0335 |
| Bloques | 27,70 | 3 | 9,23 | 1,76 | 0,3268 |
| SL | 1,66 | 1 | 1,66 | 0,32 | 0,6126 |
| Error A | 15,73 | 3 | 5,24 | 2,74 | 0,0895 |
| Encalado | 13,80 | 2 | 6,90 | 3,61 | 0,0593 |
| SL x E | 5,49 | 2 | 2,75 | 1,44 | 0,2762 |
| Error B | 22,95 | 12 | 1,91 | | |
| Total | 87,34 | 23 | | | |

Tabla 18. Análisis de varianza de la humedad del suelo de 10 – 20 cm a los 83 dds

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 42,81 | 11 | 3,89 | 2,14 | 0,1039 |
| Bloques | 31,88 | 3 | 10,63 | 9,57 | 0,0480 |
| SL | 2,97 | 1 | 2,97 | 2,67 | 0,2006 |
| Error A | 3,33 | 3 | 1,11 | 0,61 | 0,6213 |
| E | 4,27 | 2 | 2,14 | 1,17 | 0,3425 |
| SL x E | 0,36 | 2 | 0,18 | 0,10 | 0,9060 |
| Error B | 21,85 | 12 | 1,82 | | |
| Total | 64,67 | 23 | | | |

Tabla 19. Análisis de varianza de la conductividad hidráulica

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,00163 | 11 | 0,00033 | 16,35 | < 0,0001 |
| Bloques | 6,2E-06 | 3 | 0,00021 | 0,83 | 0,5592 |
| SL | 0,00163 | 1 | 0,00157 | 629,89 | 0,0001 |
| Error A | 7,5E-06 | 3 | 0,00000 | 0,27 | 0,8430 |
| E | 0,00038 | 2 | 0,00002 | 2,08 | 0,1674 |
| SL x E | 0,00014 | 2 | 0,00001 | 0,78 | 0,4813 |
| Error B | 0,00012 | 12 | 0,00001 | | |
| Total | 0,00175 | 23 | | | |

Tabla 20. Análisis de varianza del contenido de Al en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 10904,11 | 11 | 991,28 | 186,07 | < 0,0001 |
| Bloques | 6,52 | 3 | 2,17 | 0,25 | 0,8558 |
| SL | 63,34 | 1 | 63,34 | 7,37 | 0,0729 |
| Error A | 25,78 | 3 | 8,59 | 1,61 | 0,2382 |
| E | 10781,82 | 2 | 5390,76 | 1011,89 | < 0,0001 |
| Sl x E | 26,94 | 2 | 13,47 | 2,53 | 0,1212 |
| Error B | 63,93 | 12 | 5,33 | | |
| Total | 10968,04 | 23 | | | |

Tabla 21. Análisis de varianza del contenido de Ca en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 12707,34 | 11 | 1155,21 | 346,02 | < 0,0001 |
| Bloques | 6,52 | 3 | 2,17 | 0,33 | 0,8040 |
| SL | 25,22 | 1 | 25,22 | 3,87 | 0,1437 |
| Error A | 19,52 | 3 | 6,51 | 1,95 | 0,1756 |
| E | 12638,33 | 2 | 6319,17 | 1892,80 | <0,0001 |
| SL x E | 17,75 | 2 | 8,87 | 2,66 | 0,1107 |
| Error B | 40,06 | 12 | 3,34 | | |
| Total | 12747,40 | 23 | | | |

Tabla 22. Análisis de varianza del contenido de Mg en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 622,34 | 11 | 56,58 | 49,89 | < 0,0001 |
| Bloques | 1,2 | 3 | 0,4 | 1,90 | 0,3062 |
| SL | 8,74 | 1 | 8,74 | 41,44 | 0,0076 |
| Error A | 0,63 | 3 | 0,21 | 0,19 | 0,9039 |
| E | 603,04 | 2 | 265,90 | 265,90 | < 0,0001 |
| SL x E | 8,73 | 2 | 3,85 | 3,85 | 0,0511 |
| Error B | 13,61 | 12 | | | |
| Total | 635,94 | 23 | | | |

Tabla 23. Análisis de varianza del contenido de K en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 20,56 | 11 | 1,87 | 15,50 | < 0,0001 |
| Bloques | 0,40 | 3 | 0,13 | 0,31 | 0,8198 |
| SL | 5,0E-04 | 1 | 5,0E-04 | 1,2E-03 | 0,9750 |
| Error A | 1,31 | 3 | 0,44 | 3,61 | 0,0456 |
| E | 18,20 | 2 | 9,10 | 75,46 | < 0,0001 |
| SL x E | 0,65 | 2 | 0,32 | 2,68 | 0,1090 |
| Error B | 1,45 | 12 | 0,12 | | |
| Total | 22,00 | 23 | | | |

Tabla 24. Análisis de varianza de la relación Ca/Mg en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 2011,19 | 11 | 182,84 | 17,73 | < 0,0001 |
| Bloques | 28,55 | 3 | 9,52 | 3,42 | 0,1696 |
| Sist. lab. | 5,25 | 1 | 5,25 | 1,89 | 0,2633 |
| Error A | 8,34 | 3 | 2,78 | 0,27 | 0,8460 |
| Encalado | 1955,87 | 2 | 977,94 | 94,83 | < 0,0001 |
| Sist. lab. x Encalado | 13,17 | 2 | 6,59 | 0,64 | 0,5451 |
| Error B | 123,76 | 12 | 10,31 | | |
| Total | 2134,94 | 23 | | | |

Tabla 25. Análisis de varianza de la relación Mg/K en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 106,80 | 11 | 9,71 | 14,65 | < 0,0001 |
| Bloques | 0,50 | 3 | 0,17 | 0,15 | 0,9248 |
| Sist. lab. | 3,99 | 1 | 3,99 | 3,54 | 0,1565 |
| Error A | 3,39 | 3 | 1,13 | 1,70 | 0,2192 |
| Encalado | 95,70 | 2 | 47,85 | 72,20 | < 0,0001 |
| Sist. lab. x Encalado | 3,22 | 2 | 1,61 | 2,43 | 0,1298 |
| Error B | 7,95 | 12 | 0,66 | | |
| Total | 114,75 | 23 | | | |

Tabla 26. Análisis de varianza de la relación Ca/K en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 12851,44 | 11 | 1168,31 | 23,31 | < 0,0001 |
| Bloques | 259,15 | 3 | 86,38 | 2,34 | 0,2511 |
| Sist. lab. | 117,09 | 1 | 117,09 | 3,18 | 0,1726 |
| Error A | 110,51 | 3 | 36,84 | 0,73 | 0,5511 |
| Encalado | 12222,62 | 2 | 6111,31 | 121,91 | < 0,0001 |
| Sist.lab. x Encalado | 142,08 | 2 | 71,04 | 1,42 | 0,2802 |
| Error B | 601,53 | 12 | 50,13 | | |
| Total | 13452,98 | 23 | | | |

Tabla 27. Análisis de varianza de la relación Ca + Mg + K/Al en el suelo

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 19210,63 | 11 | 1746,42 | 25,13 | < 0,0001 |
| Bloques | 137,57 | 3 | 45,86 | 0,50 | 0,7063 |
| Sist. lab. | 23,46 | 1 | 23,46 | 0,26 | 0,6467 |
| Error A | 273,17 | 3 | 91,06 | 1,31 | 0,3164 |
| Encalado | 18746,34 | 2 | 9373,17 | 134,87 | < 0,0001 |
| Sist. lab. x Encalado | 30,09 | 2 | 15,04 | 0,22 | 0,8084 |
| Error B | 833,96 | 12 | 69,50 | | |
| Total | 20044,58 | 23 | | | |

Tabla 28. Análisis de varianza de la altura de planta del maíz forrajero

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,10 | 11 | 0,01 | 0,45 | 0,8993 |
| Bloques | 0,06 | 3 | 0,02 | 4,01 | 0,1421 |
| Sist. lab. | 2,2E-03 | 1 | 2,2E-03 | 0,44 | 0,5543 |
| Error A | 0,02 | 3 | 0,01 | 0,26 | 0,8544 |
| Encalado | 0,02 | 2 | 0,01 | 0,48 | 0,6319 |
| Sist. lab. x Encalado | 1,1E-03 | 2 | 5,3E-04 | 0,03 | 0,9732 |
| Error B | 0,23 | 12 | 0,02 | | |
| Total | 0,33 | 23 | | | |

Tabla 29. Análisis de varianza del índice del área foliar del maíz forrajero

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 11,30 | 11 | 1,03 | 2,57 | 0,0600 |
| Bloques | 0,81 | 3 | 0,27 | 0,83 | 0,5603 |
| Sist. lab. | 0,03 | 1 | 0,03 | 0,10 | 0,7691 |
| Error A | 0,98 | 3 | 0,33 | 0,82 | 0,5086 |
| Encalado | 5,68 | 2 | 2,84 | 7,09 | 0,0093 |
| Sist. lab. x Encalado | 3,80 | 2 | 1,90 | 4,75 | 0,0303 |
| Error B | 4,80 | 12 | 0,40 | | |
| Total | 16,10 | 23 | | | |

Tabla 30. Análisis de varianza del rendimiento de forraje verde

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 607,27 | 11 | 55,21 | 1,87 | 0,1481 |
| Bloques | 35,88 | 3 | 11,96 | 0,45 | 0,7377 |
| Sist. Lab. | 249,23 | 1 | 249,23 | 9,30 | 0,0555 |
| Error A | 80,42 | 3 | 26,81 | 0,91 | 0,4655 |
| Encalado | 223,91 | 2 | 111,96 | 3,80 | 0,0528 |
| Sist.Lab. x Encalado | 17,83 | 2 | 8,91 | 0,30 | 0,7446 |
| Error B | 353,82 | 12 | 29,49 | | |
| Total | 961,09 | 23 | | | |

Tabla 31. Análisis de varianza del rendimiento de materia secas del forraje verde

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 43,32 | 11 | 3,94 | 1,70 | 0,1878 |
| Bloques | 3,14 | 3 | 1,05 | 0,40 | 0,7616 |
| Sist. lab. | 2,77 | 1 | 2,77 | 1,07 | 0,3771 |
| Error A | 7,76 | 3 | 2,59 | 1,12 | 0,3808 |
| Encalado | 24,39 | 2 | 12,19 | 5,26 | 0,0229 |
| Sist. lab. x Encalado | 5,26 | 2 | 2,63 | 1,14 | 0,3535 |
| Error B | 27,80 | 12 | 2,32 | | |
| Total | 71,12 | 23 | | | |

Tabla 32. Análisis de varianza del contenido foliar de N

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 476,37 | 11 | 43,31 | 5,35 | 0,0037 |
| Bloques | 81,59 | 3 | 27,20 | 3,60 | 0,1606 |
| Sist. lab. | 40,82 | 1 | 40,82 | 5,40 | 0,1028 |
| Error A | 22,69 | 3 | 7,56 | 0,94 | 0,4538 |
| Encalado | 270,91 | 2 | 135,46 | 16,75 | 0,0003 |
| Sist. lab. x Encalado | 60,36 | 2 | 30,18 | 3,73 | 0,0549 |
| Error B | 97,05 | 12 | 8,09 | | |
| Total | 573,43 | 23 | | | |

Tabla 33. Análisis de varianza del contenido foliar de P

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 0,90 | 11 | 0,08 | 2,57 | 0,0601 |
| Bloques | 0,04 | 3 | 0,01 | 1,19 | 0,4447 |
| Sist. lab. | 1,7E-03 | 1 | 1,7E-03 | 0,14 | 0,7306 |
| Error A | 0,04 | 3 | 0,01 | 0,37 | 0,7794 |
| Encalado | 0,81 | 2 | 0,41 | 12,72 | 0,0011 |
| Sist. lab. x Encalado | 0,01 | 2 | 0,01 | 0,17 | 0,8460 |
| Error B | 0,38 | 12 | 0,03 | | |
| Total | 1,29 | 23 | | | |

Tabla 34. Análisis de varianza del contenido de Ca foliar

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 34,31 | 11 | 3,12 | 1,80 | 0,1629 |
| Bloques | 3,41 | 3 | 1,14 | 0,93 | 0,5217 |
| Sist. lab. | 9,38 | 1 | 9,38 | 7,72 | 0,0691 |
| Error A | 3,65 | 3 | 1,22 | 0,70 | 0,5686 |
| Encalado | 9,39 | 2 | 4,70 | 2,71 | 0,1066 |
| Sist.lab.x Encalado | 8,49 | 2 | 4,25 | 2,45 | 0,1278 |
| Error B | 20,76 | 12 | 1,73 | | |
| Total | 55,07 | 23 | | | |

Tabla 35. Análisis de varianza del contenido de Mg foliar

| FV | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 68,84 | 11 | 6,26 | 6,83 | 0,0012 |
| Bloques | 4,76 | 3 | 1,59 | 4,25 | 0,1329 |
| Sist. lab. | 0,22 | 1 | 0,22 | 0,59 | 0,4984 |
| Error A | 1,12 | 3 | 0,37 | 0,41 | 0,7500 |
| Encalado | 36,48 | 2 | 18,24 | 19,92 | 0,0002 |
| Sist. lab. x Encalado | 26,26 | 2 | 13,13 | 14,33 | 0,0007 |
| Error B | 10,99 | 12 | 0,92 | , | |
| Total | 79,83 | 23 | | | |

Tabla 36. Análisis de varianza del contenido de K foliar

| FV | SC | GI | CM | F | p-valor |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 61,05 | 11 | 5,55 | 6,48 | 0,0016 |
| Bloques | 5.,1 | 3 | 1,84 | 14,09 | 0,0284 |
| Sist. lab. | 0,7 | 1 | 0,77 | 5,91 | 0,0933 |
| Error A | 0.39 | 3 | 0,13 | 0,15 | 0,9262 |
| Encalado | 30,92 | 2 | 15,46 | 18,06 | 0,0002 |
| Sist. lab. x Encalado | 23,46 | 2 | 11,73 | 13,70 | 0,0008 |
| Error B | 10,28 | 12 | 0,86 | | |
| Total | 71,33 | 23 | | | |