

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LA LABRANZA MECANIZADA Y ENMIENDAS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO, LA DINÁMICA DEL C ORGÁNICO Y LA PRODUCCIÓN DE PASTO TRANSVALA (*Digitaria decumbens* Stent.) EN SAN MATEO DE ALAJUELA, COSTA RICA.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos

RANDALTH CRISTOBAL MEDINA FLORES

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2023

## **DEDICATORIA**

A Dios por las oportunidades, sabiduría y fortaleza brindada.

A mi esposa y mamá por alentarme siempre a pesar de las inconveniencias y que con mucho esfuerzo siempre estuvieron presentes en este proceso.

A mis hijas, que representan el motor que siempre me impulsa a seguir adelante.

A mis hermanos y amistades, refugio donde encuentro consejos y alegría.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, nuestro creador y dador de vida.

A mi maestro, director de tesis y amigo Dr. Jorge Leiva Sanabria por su apoyo incondicional y acompañamiento en cada una de las fases del desarrollo de este proyecto de tesis.

A mi cotutor M.Sc. Rafael Mata Chinchilla y miembros de mi comité asesor, los maestros M.Sc. Rodolfo WingChing-Jones y M.Sc. Sisgo Acuña Chinchilla, quienes a través de sus consejos contribuyeron significativamente a la realización de mi tesis.

Gracias la dirección del PPCARN y todo su personal docente y administrativo, por su importe labor en la transmisión de conocimientos y preparación académica de nosotros los estudiantes.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), gestores altruistas que impulsa el desarrollo intelectual en las personas y quienes hicieron posible la realización y culminación de mis estudios de maestría.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-León, por nutrir mis conocimientos e inculcar el deseo de continuar aprendiendo y de manera muy especial a mi mentora y maestra Dra. Xiomara Castillo Altamirano.

A la Universidad de Costa Rica, y su Centro de Investigaciones Agronómicas-UCR, particularmente al laboratorio de Recursos Naturales y sus colaboradores: Ing. Oldemar Vargas y M.Sc. Pamela Zúñiga, por su esmero y apoyo constante.

Al Centro de Investigaciones en Nutrición Animal-UCR y al Ministerio de Agricultura (MAG) agencia de extensión de San Mateo de Alajuela-Costa Rica por su total y completa disposición.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos.



---

Dr. Juan Carlos Méndez Fernández  
**Representante de la Decana  
Sistema de Estudios de Posgrado**



---

Dr. Jorge Armando Leiva Sanabria  
**Director de tesis**



---

M.Sc. Sisgo Acuña Chinchilla  
**Asesor**



---

M.Sc. Rodolfo Wing Ching-Jones  
**Asesor**



---

Dra. Catalina Salas Durán  
**Directora**  
**Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales**



---

Randalth Cristobal Medina Flores  
**Candidato**

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
HOJA DE APROBACIÓN.....	iv
TABLA DE CONTENIDO.....	v
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ANEXOS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvi
Capítulo 1. Introducción.....	1
Pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.).....	1
Efectos del pastoreo en las propiedades del suelo y forraje.....	1
Estado de los suelos dedicados a la ganadería.....	2
Sistemas de labranza.....	4
Mecanismos de acción de la labranza.....	4
Propiedades físicas del suelo y labranza.....	5
Efectos del subsolador y otros implementos de cincel.....	6
Efecto de los implementos de inversión de prisma.....	6
Alteraciones físicas del suelo.....	7
El carbono orgánico del suelo.....	8
Uso de enmiendas.....	10
LITERATURA.....	11
Capítulo 2. Evaluación de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la dinámica del C orgánico y la actividad microbiana del suelo cultivado con pasto de corta Transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.....	17
RESUMEN.....	17
INTRODUCCIÓN.....	18
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21

Descripción del área de estudio.....	21
Diseño del Experimento .....	21
Muestreo de suelos .....	22
VARIABLES EVALUADAS.....	23
Análisis de datos.....	25
RESULTADOS .....	26
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas en la dinámica del carbono orgánico .	26
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la actividad y biomasa microbiana.....	29
DISCUSIÓN .....	34
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas en la dinámica del carbono orgánico del suelo .....	34
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la actividad microbiana .....	36
CONCLUSIONES .....	38
LITERATURA .....	39
Capítulo 3. Efecto de tres implementos de labranza mecanizada y uso de enmiendas sobre la calidad física y química del suelo cultivado con pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.....	44
RESUMEN .....	44
INTRODUCCIÓN .....	46
MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
Descripción del área de estudio.....	48
Diseño del Experimento .....	48
Muestreo de suelos .....	49
VARIABLES EVALUADAS.....	50
Análisis de datos.....	55
RESULTADOS .....	56
Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades químicas del suelo.....	56
Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades físicas del suelo. ....	61
DISCUSIÓN .....	71
Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades químicas del suelo.....	71
Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades físicas del suelo. ....	75

CONCLUSIONES .....	80
LITERATURA .....	81
ANEXOS .....	94
Capítulo 4. Evaluación de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) y su calidad nutricional en San Mateo de Alajuela, Costa Rica. ....	110
RESUMEN .....	110
INTRODUCCIÓN .....	112
MATERIALES Y MÉTODOS .....	114
Descripción del área de estudio.....	114
Diseño del Experimento .....	114
Muestreos .....	117
Variables evaluadas.....	117
Análisis de datos.....	118
RESULTADOS .....	119
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) y su calidad nutricional.....	119
DISCUSIÓN .....	124
Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) y su calidad nutricional.....	124
CONCLUSIONES .....	127
LITERATURA .....	128
DISCUSIÓN GENERAL .....	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	138

## RESUMEN

El pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.), de gran importancia en los sistemas de producción ganadera de Costa Rica, es principalmente utilizado como pasto de corte para su henificación. A pesar de su relevancia en la economía del país, la ganadería se percibe como una de las principales actividades que contribuyen a la degradación de los suelos y el deterioro de sus propiedades. En este trabajo se establecieron parcelas experimentales con un diseño de bloques completos al azar, donde se evaluó el efecto de la labranza y enmiendas combinadas de cal ( $\text{CaCO}_3$ ) y compost (elaborado a base de gallinaza) sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo, comparando dos tipos de análisis, carbono total ( $C_{\text{total}}$ ) y carbono activo ( $C_{\text{oxp}}$ ). También fueron evaluadas las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, además de la producción y calidad nutricional del pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) en un Ultisol de San Mateo de Alajuela, Costa Rica. Los tratamientos consistieron en Subsolador, Palín Mecánico, Descompactador, Subsolador+Enmienda, Palín Mecánico+Enmienda, Descompactador+Enmienda y un Control. Las variables fueron evaluadas 78, 173 días después de la aplicación de los tratamientos y se realizó una evaluación adicional a los 263 días para el caso del carbono activo y algunas variables físicas. El  $C_{\text{oxp}}$  mostró ser una variable susceptible al manejo, el cual reflejó el efecto de los tratamientos durante los periodos de evaluación. Por el contrario, el  $C_{\text{total}}$  no fue alterado por efecto de los tratamientos, ya que no mostró diferencias durante el periodo de evaluación. Los valores más altos de  $C_{\text{oxp}}$  se observaron en el Subsolador+Enmienda a los 78 días, el Descompactador+ Enmienda a los 173 días y el Palín Mecánico+Enmienda a los 263 días. El uso de enmiendas y labranza promovió la Tasa de respiración en los dos periodos que se evaluó, no así la Biomasa microbiana, que fue beneficiada por los tratamientos de solo labranza a los 78 días y que, además, el efecto de los tratamientos presenta una dilución aparente a los 173 días donde no se observaron diferencias. La combinación de labranza y enmiendas también mostró una corrección significativa de las propiedades acidas del suelo (acidez, pH, saturación de acidez), un incremento de bases como el calcio y el potasio y así mismo una reducción del contenido de hierro y manganeso edáfico, cuyos efectos más promisorios se presentaron en los tratamientos de Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda. De igual forma las condiciones físicas se vieron afectadas positivamente por la labranza y la aplicación de enmiendas, ya sea de forma separada o conjunta. Para el caso de la densidad aparente y la porosidad, fueron favorecidas en todos los tratamientos a los 78 días comparados con el Control, resaltando como mejor tratamiento el Subsolador+Enmienda. Estos resultados no son permanentes, ya que con el paso del tiempo estos cambios desaparecen, alcanzando incluso las condiciones previas a la aplicación de los tratamientos. Los tratamientos fueron efectivos en la reducción de la resistencia a la penetración, la infiltración y la retención de humedad del suelo, cuyos resultados más prometedores se observaron en el Subsolador+Enmienda y Palín Mecánico+Enmienda para el caso de la infiltración y el



Palín Mecánico como tratamiento en el que se observó mayor agua disponible. Los Ultisoles, al ser suelos ácidos, que presentan en ciertos casos condiciones físicas desfavorables y pobres en nutrientes, la implementación de labranza, el encalado y la fertilización orgánica, permitieron el incremento de la producción de pasto transvala, mejorando la disponibilidad de nutrientes para la nutrición del pasto. Estos resultados se reflejaron en ambos periodos de evaluación, lo que implica una residualidad de los tratamientos incluso a los 173 días. Sin embargo, no se encontraron diferencias en la calidad nutricional del pasto entre los tratamientos en las edades de rebrote en las que se analizó el pasto (78 y 95 días, 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos respectivamente).

## ABSTRACT

Transvala grass (*Digitaria decumbens* Stent.) is of great importance in livestock production systems in Costa Rica, where it is mainly grown as a mechanical harvest grass for haymaking. Despite its importance in the country's economy, livestock farming is perceived as one of the main activities that contribute to soil degradation and the deterioration of its properties. In this work, experimental plots were established with a randomized complete block design, where the effect of tillage and combined amendments of lime ( $\text{CaCO}_3$ ) and compost (made from chicken manure) on the dynamics of soil organic carbon was evaluated comparing two types of analysis, total carbon ( $C_{\text{total}}$ ) and active carbon ( $C_{\text{oxp}}$ ). The soil physical, chemical and microbiological properties were also evaluated, as well as production and nutritional quality of transvala grass (*Digitaria decumbens* Stent.) in an Ultisol from San Mateo de Alajuela, Costa Rica. The treatments consisted of Subsoiler, Mechanical Spader plow, Decompacter, Subsoiler+Amendment, Mechanical Spader plow+Amendment, Decompacter+Amendment and a Control. The variables were evaluated 78, 173 days after the application of the treatments and an additional evaluation was carried out at 263 days for active carbon and some physical variables. The  $C_{\text{oxp}}$  was a variable susceptible to management, which reflected the effect of treatments during evaluation periods. On the contrary,  $C_{\text{total}}$  was not altered by the applied treatments, since it did not show significant differences during the study. The highest values of  $C_{\text{oxp}}$  were observed in the Subsoiler+Amendment at 78 days, the Decompacter+Amendment at 173 days and the Mechanical spader plow+Amendment at 263 days. The use of amendments and tillage increases the soil respiration rate during the two evaluation periods, but not the soil microbial biomass, which was benefited by the treatments of only tillage at 78 days and that, in addition, the effect of the treatments disappeared at 173 days since no differences were observed. The combination of tillage and soil amendments also showed a significant correction of soil acidity (exchangeable acidity, pH, acidity saturation), an increase in soil bases such as calcium and potassium, and a reduction in soil available iron and manganese contents, whose most promising effects were observed in the spader plow+Amendment and Decompacter+Amendment treatments. Similarly, soil physical indicators were positively affected by tillage and amendment application, either applied separately or together. In the case of bulk density and porosity, they were positively changed in all treatments at 78 days compared to the Control, with Subsoiler+Amendment showing the most promising results. Nonetheless, the treatment effects were not permanent, since with the passage of time these changes disappear, even reaching the baseline conditions prior to the treatment application. The treatments were effective in reducing soil penetration resistance, increase infiltration as well as soil moisture retention, where the most interesting results were observed in the Subsoiler+Amendment and Spader plow+Amendment in the case of infiltration and the Spader plow as the treatment with significantly more available water. Ultisols are acid soils, which in certain cases present unfavorable physical conditions and low levels of soil nutrients, where implementation of tillage, liming and organic fertilization, allowed the increase in the production of transvala grass, and improving the availability of nutrients for pasture nutrition. These results were reflected in both evaluation periods, which showed

some degree of treatment residuality even at 173 days after treatment application. However, no differences were found in the nutritional quality of the transvala grass between the treatments at the grass regrowth (78 and 95 days grass regrowth time, which coincides with 78 and 173 days after the application of the treatments, respectively).

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro N.</b>	<b>Pag.</b>
Cuadro 1. Características físicas y químicas del compost a base de gallinaza .....	21
Cuadro 2. Características químicas del material de encalado .....	22
Cuadro 3. Tratamientos de labranza mecanizada y enmienda orgánica .....	22
Cuadro 4. Tamaño del efecto de los tratamientos sobre la tasa de respiración microbiana en función del control a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	30
Cuadro 5. Tamaño del efecto de los tratamientos sobre la biomasa microbiana en función del control a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	32
Cuadro 6. Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades ácidas del suelo analizadas en dos momentos .....	57
Cuadro 7. Efecto de la labranza y enmiendas sobre el contenido de bases y la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo analizadas en dos momentos .....	59
Cuadro 8. Efecto de la labranza y enmiendas sobre el nitrógeno y los micronutrientes del suelo analizados en dos momentos .....	61
Cuadro 9. Efecto de la labranza y enmiendas sobre la producción y calidad nutricional del pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) en dos momentos .....	123

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura N.</b>	<b>Pag.</b>
Figura 1. Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre el Carbono activo del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos .....	27
Figura 2. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre el Carbono total del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.....	28
Figura 3. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la tasa de respiración microbiana del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	31
Figura 4. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la biomasa microbiana del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.....	33
Figura 5. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la densidad aparente del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos .....	62
Figura 6. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la porosidad del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos.....	64
Figura 7. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	65
Figura 8. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la infiltración instantánea y básica de acuerdo con el modelo de Kostiakov a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos.....	67
Figura 9. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la retención de humedad de acuerdo con el modelo de van Genuchten los 78 días después de la aplicación de los tratamientos.....	68
Figura 10. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la distribución de tamaño de poros de acuerdo con la curva de retención de humedad a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos.....	70
Figura 11. Croquis del experimento .....	115
Figura 12. Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la altura del pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	120
Figura 13. Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la cobertura del pasto transvala ( <i>Digitaria decumbens</i> Stent.) a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos .....	122

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo N.</b>	<b>Pag.</b>
Anexo 1. Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 0-5 cm .....	94
Anexo 2. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 6-10cm.....	95
Anexo 3. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 11-15 cm.....	96
Anexo 4. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 16-20 cm.....	97
Anexo 5. Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 21-25 cm .....	98
Anexo 6. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 26-30 cm.....	99
Anexo 7. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 31-35 cm.....	100
Anexo 8. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 35-40 cm.....	101
Anexo 9. Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 0-5 cm .....	102
Anexo 10. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 6-10 cm.....	103

Anexo 11. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 11-15 cm.....	104
Anexo 12. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 16-20 cm.....	105
Anexo 13. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 21-25 cm.....	106
Anexo 14. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 26-30 cm.....	107
Anexo 15. Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 31-35 cm.....	108
Anexo 16. Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 36-40 cm .....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS

DAAD: Servicio Alemán de Intercambio Académico

$C_{total}$ : carbono total

$C_{exp}$ : carbono activo

DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos

MPa: megapascales

MOS: materia orgánica del suelo

CIC: capacidad de intercambio de cationes

CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

EQ: equivalente químico

EG: efectividad granulométrica

PRNT: poder relativo de neutralización total

UV: ultravioleta

CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas

UCR: Universidad de Costa Rica

ANDEVA: análisis de varianza

T.R: tasa de respiración

B.M: biomasa microbiana

CI: intervalo de confianza

$\rho_a$ : densidad Aparente

$\rho_p$ : densidad de partículas sólidas

$f$ : porosidad total

$\theta_g$ : humedad gravimétrica

$\theta_v$ : humedad volumétrica

hPa: hecto pascales

$h$ : tensión o potencial matricial

SA: saturación de acidez



AD: agua disponible

AFD: agua fácilmente disponible

PDDR: poros de drenaje rápido

PDDL: poros de drenaje lento

PDAD: poros de agua disponible

PAND: poros de agua no disponible

MS: materia seca

PC: proteína Cruda

DIVMS: digestibilidad In-Vitro de la Materia Seca

CINA: Centro de Investigaciones en Nutrición Animal

## Capítulo 1. Introducción

### **Pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.)**

El pasto Transvala, originario de Sudáfrica, se introdujo a los Estados Unidos en el año de 1935 y traída a Costa Rica en 1970, donde ha sido establecido en distintas zonas geográficas del país, pero de manera particular en la región Chorotega, donde se utiliza como pasto de corte y para su henificación. El sistema tradicional de henificación de esta y otras especies en Costa Rica se da en sistemas de secano. (Tecnológicos, 2019).

Se caracteriza por ser un pasto perenne con reproducción vegetativa estolonífera, de porte semierecto y vigoroso, que presenta una cobertura muy densa del suelo y que es capaz de alcanzar los 100 cm de altura en las condiciones apropiadas. Las hojas que presenta este pasto son lineales con una longitud de 10 a 25 cm y una anchura de entre 2 y 7 mm, con ambas caras lisas. El pasto Transvala se adapta muy bien a los regímenes lluviosos subtropicales, con más de 800 mm anuales. Su cultivo se puede dar en altitudes del nivel del mar hasta los 1.000 msnm, con un rango de temperatura que va entre 25 y 40 °C (Cerdas & Vallejos, 2012).

La edad de rebrote determina la calidad del forraje y por lo general, las gramíneas forrajeras como el pasto Transvala, son capaces de mantener las características nutricionales de manera aceptable (contenido de proteína, fibra, energía y digestibilidad) incluso, hasta los 45 días después del rebrote. A partir de este periodo la calidad del pasto se reduce significativamente, de manera tal que dichos valores nutricionales no son aptos para la producción animal (Morales, 2006).

### **Efectos del pastoreo en las propiedades del suelo y forraje**

El pastoreo animal, siendo una de las actividades más comunes en los sistemas de producción agropecuaria, incluso en áreas dedicadas a producción de pasto de corte, es un factor de suma importancia que contribuye a la variabilidad y heterogeneidad de las propiedades tanto, químicas, físicas y biológicas que caracterizan los suelos (Montanari et al., 2013). Como consecuencia de esta actividad en las áreas de pastoreo, son frecuentes y muy evidentes los deterioros de las propiedades físicas y biológicas del suelo, lo cual,

guarda una estrecha relación con la reducción de la producción de biomasa y cobertura vegetal, sobre todo en periodos de sequía (Schnabel, 1997).

A simple vista es posible apreciar los efectos del pisoteo del ganado en los terrenos de pastoreo, la modificación de la superficie en cuanto a la reducción de la cubierta vegetal y su micro relieve, pueden observarse las huellas del ganado y la acumulación de agua en ellas, producto de la reducción del volumen de suelo y las limitaciones en la infiltración del agua (WingChing-Jones et al., 2009). El deterioro de las condiciones físicas limitará la producción de forraje, dado que el desarrollo de los pastos está relacionado a las posibilidades de crecimiento radicular, el cual, estará ligado a la densidad y al grado de resistencia a la penetración de los suelos (Montanari et al., 2013). Además, el volumen explorado por las raíces se volverá limitado a medida que incrementa la compactación del suelo, debido a que la raíz deberá esforzarse más y demandará un mayor suministro de agua y nutrientes, los cuales tendrá de forma muy limitada. Por lo tanto, la limitación de crecimiento de las plantas se asocia directamente al deficiente desarrollo radicular, que a su vez con frecuencia se da por un inadecuado manejo del suelo, que causa formas de compactación (Roque García, 2015), como es el caso de la aparición de capas adensadas producto del peso del animal en áreas dedicadas al pastoreo (Demuner et al., 2014)

La producción de forraje está relacionada también a factores como: la profundidad del suelo, el manejo, la época (Martínez et al., 1992), el material parental y el uso que se le da al suelo, el cual también afecta el grado de compactación, por ende, la resistencia a la penetración (Agüero & Alvarado, 1983). Por otro lado, estudios realizados por Tesouro et al. (2013) demostraron que el rendimiento del cultivo de trigo no es afectado al mejorar condiciones de labranza y las propiedades físicas del suelo como: densidad aparente, resistencia a la penetración, infiltración y porosidad.

### **Estado de los suelos dedicados a la ganadería**

Los suelos ganaderos generalmente presentan niveles de compactación mucho más altos que los suelos bajo cultivo. Sin embargo, la principal diferencia es que la superficie de suelos de cultivos, en general, no presentan compactación en los primeros centímetros, pero sí a mayores profundidades por efecto del piso de arado. Caso contrario sucede en suelos ganaderos, donde la mayor compactación se da en los primeros centímetros de profundidad,

que por efecto de pisoteo o el tránsito de maquinaria para cosecha del pasto genera compactación en las capas superficiales (Agüero & Alvarado, 1983). La compactación de la capa superficial tiene efectos negativos para el suelo generados por el pisoteo del ganado (Frolla, 2016), que serán mayores a medida que se aumente el tránsito animal y de maquinaria (WingChing-Jones et al., 2009). Sin embargo, por efecto del alto contenido de carbono proveniente de raíces y los elevados volúmenes de estiércol, la densidad aparente puede verse reducida por una buena estructuración del suelo producto de la actividad microbiana al descomponer los residuos orgánicos en algunas áreas (Martinez et al., 2010). No obstante, en la mayoría de las áreas no se da esto, en cambio, las áreas sin cubierta vegetal se encuentran expuestas al impacto de las gotas de lluvia, lo que fomenta procesos de erosión hídrica, al limitar la infiltración del agua y propiciar el escurrimiento superficial (Montanari et al., 2013). La capa superficial de los suelos es la más afectada por la alteración de las condiciones físicas del mismo, que tiene como consecuencia el arrastre de partículas y la degradación del terreno (Prieto-Méndez et al., 2013).

Los efectos y alteraciones en las propiedades físicas del suelo por acción del pisoteo del ganado en terrenos planos se dan principalmente por el peso del animal, ejercido en un área que se reduce a la superficie de la pezuña de forma vertical, el cual implica una compresión de las partículas del suelo en un área estimada de 100 cm<sup>2</sup>. En el caso de aumentar la pendiente o la humedad del terreno, más allá de la presión vertical ejercida por el pisoteo, se ejercerá una presión tangencial debido al deslizamiento de la pisada, en cuyo caso el área afectada podría duplicarse (WingChing-Jones et al., 2009). Como consecuencia de esto, los suelos con pasturas utilizados por periodos largos, sometidos a sobrepastoreo y exceso de tránsito de maquinaria presentan valores de resistencia a la penetración de hasta 4,5 MPa en los primeros 20 cm de profundidad (Martínez & Zinck, 2004), valores que son extremadamente altos, si se considera que el valor crítico de resistencia a la penetración es  $\geq 2$  MPa como limitante para el crecimiento y desarrollo de las raíces encargadas de la absorción (Tormena et al., 1999).

El estado de humedad de los suelos sometidos a pastoreo es otro factor que incide sobre su compactabilidad. Pietola et al. (2005) afirman que los suelos en estado de saturación sometidos a pastoreo son inducidos a un efecto de amasado y mezclado por el tránsito de

los animales, lo que al final se traduce en el incremento de la densidad aparente. Sin embargo, la magnitud en estos cambios depende de otros factores, entre los que se pueden mencionar: la vegetación, la densidad de raíces y la cubierta de materia seca (WingChing-Jones et al., 2009).

### **Sistemas de labranza**

La labranza consiste en la modificación de las propiedades del suelo mediante labores que remueven la capa superior del suelo y que permite el control de las malas hierbas, facilita la germinación de la semilla y el desarrollo vegetal (Baker et al., 2008). La labranza en los sistemas productivos figura como un factor de suma importancia para la producción agrícola, ya que esta labor es indispensable en los procesos de mezcla, desplazamiento y transporte de suelo (Mehuys et al., 2009). Por otro lado, los sistemas agrícolas donde los procesos de remoción de suelo son limitados, se propicia la estructuración del suelo, aumenta la humedad del mismo y facilita la penetración radicular. Los suelos no removidos presentarán menor resistencia a la penetración (Baker et al., 2008), a su vez, las operaciones de labranza no tienen efecto significativo en la estabilidad estructural de un suelo, salvo que este sea sometido a operaciones muy frecuentes y repetidas durante un periodo determinado (Rodríguez, 1998).

### **Mecanismos de acción de la labranza**

*Inversión:* Es el proceso a través del cual el suelo es volteado, alterando el perfil natural del mismo, exponiendo a la superficie el perfil más profundo y aterrando la capa que se situaba en la superficie (Roque Garcia, 2015).

*Mezcla:* Esta operación, realizada generalmente luego del proceso de inversión, genera una capa de suelo que combina los materiales de los perfiles más profundos con los más superficiales de manera homogénea, a una profundidad estimada de 10 cm.

*Rotura:* Esta acción rompe las capas de suelo sin desintegrar los agregados existentes y sin generar la mezcla del perfil.

*Pulverización:* Se define como una operación dirigida a desintegrar los terrones del suelo con el fin de producir una capa de terreno mullida y uniforme (Baker et al., 2008).

## **Propiedades físicas del suelo y labranza**

La compactación depende de las características propias de cada suelo, como textura y estructura, las cuales, a su vez, son influenciadas por el cultivo que se implemente y su manejo (Montanari et al., 2010). Por otro lado, el grado de compactación del suelo será menor a medida que aumenta la humedad del suelo y la profundidad (Agüero & Alvarado, 1983) y el proceso inverso sucede con valores bajos de humedad, los cuales tendrán influencia directa en el incremento de compactación que presenta un suelo (Cavallini et al., 2010).

La compactación de suelos puede ser estimada mediante la densidad aparente y la resistencia a la penetración. La densidad aparente es un buen indicador de las condiciones físicas de un suelo, para diferentes tipos de manejo (Santana et al., 2014). Entre los dos parámetros, la resistencia a la penetración es un mejor indicador del efecto del pisoteo animal a nivel superficial (Martínez et al., 2010). Según Camacho et al. (2015) y Vallejos et al. (2014), generalmente incrementa en función de la profundidad. Puesto que a mayor profundidad el suelo presenta mayor densidad, por efecto del peso de las capas superiores y la disminución del contenido de materia orgánica (Cadena et al., 2012). La compactación del suelo con base en la densidad aparente está estrechamente relacionado a la textura y en menor grado con la profundidad (Martínez et al., 1992). Los valores críticos de resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo para un crecimiento óptimo en la mayoría de los cultivos son de 2 MPa y  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente, donde valores mayores a los citados se consideran muy restrictivos para el crecimiento radicular (Montanari, et al., 2013).

El nivel de estructuración del suelo, que afecta los agregados y su densidad, la porosidad y el tenor de materia orgánica, son parámetros que inciden directamente en los procesos hídricos del mismo (Baker et al., 2008). La labranza mecanizada modifica de forma significativa atributos físicos de suelo, como es la reducción de la densidad aparente y un aumento de la porosidad total en los primeros 10 cm de profundidad, en comparación con suelos sin labra (Camacho et al., 2015). Pero la labranza realizada cuando el suelo tiene altos contenidos de humedad no presenta los efectos esperados, debido a que el suelo pasa

con menor fricción entre las herramientas de ruptura o corte (por su alta plasticidad), efecto que se verá aún más marcado en suelos con altos contenidos de arcilla (Vallejos et al., 2014).

### **Efectos del subsolador y otros implementos de cincel**

Los implementos cuyo mecanismo de acción permita el volteo mínimo y ruptura del suelo, en especial en los agregados más finos de forma homogénea, además de la separación de los macroporos del suelo, permitirán una mayor infiltración del agua en el mismo (Camacho et al., 2015). Algunas de las limitantes para el desarrollo de las plantas, generadas por capas compactadas de suelo pueden ser corregidas con la utilización oportuna y adecuada de implementos de labranza profunda como el subsolador, el cual permite la ruptura del suelo compactado (Martínez et al., 2008). Vallejos et al. (2014), en un estudio realizado en el cultivo de soja, reportaron que los cambios físicos positivos por efecto del uso de subsolador perduran durante todo el ciclo del cultivo. Sin embargo, estas alteraciones físicas se limitan a periodos cortos que no superan los dos años, la duración de este efecto depende del manejo que se le da al suelo luego de la labor (Tesouro et al., 2013).

Las propiedades físicas del suelo como densidad aparente y resistencia a la penetración son alteradas de forma positiva con el uso de subsolador y rastra hasta la profundidad donde ejercen su acción (Ohep et al., 1998). A diferencia del arado de discos, el subsolador no produce volteo del suelo y deja los rastrojos de cosechas anteriores sobre la superficie del suelo, lo que propicia la reducción de la velocidad de escurrimiento superficial de agua, garantizando una mejor infiltración (Caceres Uscca, 2017).

### **Efecto de los implementos de inversión de prisma**

Por efecto del uso de rastra, la cual solamente penetra en la capa superficial del suelo, es posible observar compactación a mayores profundidades del perfil edáfico, debido a que el uso de este implemento produce compactación de las capas inferiores a la profundidad de penetración del implemento, debido a la compresión mecánica y a la acumulación de arcillas en capas más profundas (Ohep et al., 1998). Los sistemas de labranza a base de aradura y grada tienen efecto directo en la reducción del contenido de materia orgánica del

suelo, sin reducir la densidad de capas más profundas, lo que afecta de forma directa el intercambio de fluidos como agua y aire del suelo, con la atmosfera y el desarrollo de las raíces de las plantas (Santana et al., 2014). La inversión del perfil del suelo provoca una rápida oxigenación de este, lo que incrementa la oxidación biológica del C orgánico y la eventual pérdida como lixiviados orgánicos o gases de efecto invernadero como CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (López-Garrido et al., 2009). El arado de disco es capaz de promover el traslado de partículas de suelo a distancias considerables por su efecto en la remoción y volteo de suelo (Mehuys, 2009). Sin embargo, de acuerdo con estudios realizados por Ceballos et al. (2010) las alteraciones en las propiedades físicas e hidropedológicas de suelo producto de la labranza no dependen directamente del tipo, sino más bien de la frecuencia e intensidad de las labores y si se extienden por varios años.

### **Alteraciones físicas del suelo**

Los cambios en los atributos físicos del suelo por efecto de la labranza no siempre son permanentes, en algunos casos las condiciones tienden a regresar a los valores previos a la labranza, y en otros casos pueden alcanzar niveles de deterioro con el uso de implementos que destruyen la estructura de la capa superficial del suelo. Además, en conjunto con la acción de la lluvia y el peso del suelo generan un asentamiento natural, revirtiendo los cambios físicos generados por la labranza en densidad aparente y resistencia a la penetración (Ohep et al., 1994). También, la labranza mecanizada afecta el porcentaje de mesoporos, (Ceballos et al., 2010), lo que resulta de suma importancia pues los mesoporos son los encargados de la retención de agua fácilmente disponible (retenida a tensiones bajas) para las plantas (Rivera-Vázquez et al., 2017). Al comparar la porosidad entre un suelo poco alterado y uno cultivado, esta variable puede verse reducida en 25% tras varios años de cultivo y hasta 50% si el sistema de labranza incluye implementos y maquinaria pesada. La porosidad del suelo, por lo tanto, tiene una relación intrínseca con el crecimiento vegetal, ya que determina la magnitud del desarrollo radicular de las plantas cultivadas, las cuales se encargan de la absorción de los nutrientes que la planta necesita (Zambrano et al., 2014). Por lo que los atributos físicos del suelo y el desarrollo de los cultivos están estrechamente relacionados, dependiendo del primero, el segundo tendrá un buen o mal desarrollo (Ohep et al., 1998). El estado de las propiedades físicas del suelo es determinante



para incrementar el rendimiento en zonas de pastoreo, lo que beneficia la actividad ganadera (Camacho et al., 2015).

### **El carbono orgánico del suelo**

La fertilización química representa una respuesta incompleta ante la degradación de los suelos e implica el deterioro de los horizontes edáficos más superficiales, lo que ha motivado al uso de enmiendas de origen orgánico (Cuenca, 2019). En estudios realizados por Cardona et al. (2015), concluyeron que los suelos manejados con fertilización química presentaron una estructuración deficiente. A su vez, la fertilización nitrogenada en volúmenes amplios y de frecuente aplicación traen como consecuencia la disminución del pH y los tenores de Ca y Mg en el horizonte superficial del suelo, con mayor efecto con el uso de sulfato de amonio (Sadeghian K, 2004). La necesidad de llevar a cabo dichas enmiendas, generalmente se da por las limitaciones nutrimentales de los suelos y la disminución de los contenidos de materia orgánica. Inevitablemente, esto repercute en la capacidad de los agroecosistemas para alcanzar rendimientos aceptables en los cultivos, sobre todo por los bajos contenidos de nitrógeno, el cual es un elemento que se considera escaso en los suelos agrícolas (Rebolledo et al., 2016)

A su vez, la agricultura enfrenta el desafío de satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial, en un contexto de cambio climático y pérdida de la fertilidad de los suelos, cuyos efectos conllevan a la disminución en la calidad del suelo y el agua disponible (Ramos & Alessandra, 2019). Ante este escenario, el sector agrícola contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, por uso la quema de combustibles fósiles, aplicación de fertilizantes nitrogenados y por acelerar la mineralización de la materia orgánica, por lo que la responsabilidad que recae sobre este sector para corregir dicha problemática (Olmo Prieto, 2016).

En términos generales, la materia orgánica del suelo (MOS) está distribuida en tres componentes generales, (1) el componente lábil o activo, que está constituido por materia orgánica que se descompone rápidamente, desde días a algunos años; (2) el componente intermedio, que tarda de unos pocos años a décadas, y (3) el componente estable, que tarda décadas a siglos (Hurisso et al., 2016). En los suelos, el carbono orgánico total ( $C_{tot}$ ) es uno de los parámetros más frecuentemente estudiado y utilizado como indicador de la calidad

del suelo y de la sostenibilidad de las actividades agrícolas, puesto que afecta muchas propiedades del suelo (Salvo et al., 2010). Sin embargo, el  $C_{tot}$  no es homogéneo en términos estructurales, más bien se compone de diversas sustancias que varían en sus características químicas y físicas, y que a su vez presentan distintas tasas de descomposición (Cambardella & Elliott, 1992).

Una de las metodologías propuestas para estimar el carbono lábil o carbono activo del suelo, es la técnica de carbono oxidable con permanganato de potasio ( $C_{oxp}$ ) (Hurisso et al., 2016).  $C_{oxp}$  ha sido relacionado a formas particuladas pequeñas y pesadas del C orgánico del suelo, donde estas formas de C son más sensibles a cambios en el manejo agropecuario y representan una metodología rápida y económica de medir, y a su vez permite identificar cambios tempranos en la reserva de C del suelo (Culman et al., 2012). Aunque el  $C_{oxp}$  solo representa una pequeña fracción (5-20%) del total de materia orgánica del suelo, repercute de manera significativa en las funciones del suelo, entre las cuales se puede mencionar el reciclaje de nutrientes y su disponibilidad para las plantas, la formación de estructura y el acúmulo temprano de C en el suelo (Cambardella & Elliott, 1992).

La biomasa microbiana del suelo, por su parte es uno de los agentes con mayor influencia en el proceso de descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes, además de ser el principal factor que influye en el desarrollo de la estructura y estabilidad del suelo, también es un indicador de la calidad de este (Brookes et al., 2008). Generalmente los suelos dedicados a la ganadería tienden a presentar mayor biomasa microbiana principalmente por el aporte constante de C que se da por medio de la acumulación de raíces en el perfil del suelo y por las excretas del ganado (WingChing-Jones & Uribe, 2016). Esta biomasa microbiana está directamente asociada al C del suelo, por lo que se estima que será menor en los agroecosistemas donde se da la extracción constante de biomasa de los cultivos y la pérdida de suelo en especial en áreas expuestas a procesos de erosión hídrica (Durango et al., 2015).

Otro parámetro de relevancia para el estudio de la dinámica del carbono orgánico del suelo es la respiración microbiana, es un proceso en el cual los microorganismos al llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica oxidan el sustrato orgánico a dióxido de carbono ( $CO_2$ ), lo que les sirve a estos como fuente para la generación de energía necesaria

para su desarrollo y actividades propias de sus funciones (Durango et al., 2015). Esta actividad puede ser determinada con la medición del CO<sub>2</sub> generado como subproducto del metabolismo de los microorganismos, para lo cual es necesario incubar el suelo en recipientes cerrados en ausencia de residuos radiculares (WingChing-Jones & Uribe, 2016).

### **Uso de enmiendas**

El manejo de suelos con el uso de prácticas conjuntas en las que se combine el uso de enmiendas y a su vez también se incorporen sistemas de labranza, presenta mejoras en la calidad biológica del suelo en un tiempo realmente corto y un incremento en los valores de pH y los contenidos de materia orgánica, que, a su vez, propician el crecimiento de las poblaciones microbianas, el reciclaje de nutrientes y estructuración del suelo (Mijangos et al., 2006). Del mismo modo, enmiendas como el biocarbón incorporado al suelo, produce un incremento en el pH y sus efectos son más evidentes en suelos degradados, donde el uso de esta enmienda ha demostrado mejoras en las propiedades físicas del suelo, aumento de la capacidad de intercambio de cationes (CIC), la retención y disponibilidad de nutrientes (Olmo Prieto, 2016). La aplicación de mejoradores orgánicos al suelo como la composta, presentan efectos positivos en el rendimiento de los cultivos, principalmente por su aporte de nutrimentos al suelo, los cuales hacen la función de fertilizante, sin embargo, los cambios positivos sobre las propiedades físicas como densidad aparente no son evidentes a corto plazo (Demuner et al., 2014).

Por su relativa estabilidad, las enmiendas orgánicas a base de compost presentan un alto potencial en el proceso de secuestro y cúmulo de carbono en el suelo. Sin embargo, su estabilidad en el sustrato depende en gran medida del tipo de labores de mecanización del suelo y los sistemas de manejo que se implementen en el agroecosistema (Ramos & Alessandra, 2019). El uso de estas enmiendas incrementa las formas lábiles de carbono orgánico, y en menor medida las más recalcitrantes, sin embargo, tanto el proceso de mineralización como la humificación dependerán en gran medida del tipo de material orgánico utilizado y su proceso de elaboración (Rebolledo et al., 2016).

## LITERATURA

- Agüero, J. M. & Alvarado, A. (1983). Compactación y compactabilidad de suelos agrícolas y ganaderos de guanacaste, Costa Rica. Guanacaste: *Agronomía Costarricense*. 7 (1/2): 27-33.
- Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, W. R., Chamen, W. C., Reicosky, D. C., Ribeiro, M. F., Hobbs, P. R. (2008). Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación. Zaragoza-España: *FAO-ACRIBIA, S.A.*
- Brookes, P. C., Cayuela, M. L., Contin, M., De Nobili, M., Kemmitt, S. J., & Mondini, C. (2008). The mineralisation of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. *Waste Management*, 28(4), 716-722.
- Cáceres Uscca, R. E. (2017). Habilitación de praderas nativas compactadas a través de sistemas de labranza en un ecosistema del altiplano Puno. Puno-Perú: *Universidad Nacional del Altiplano*.
- Cadena, B. P., Egas B, D., Ruiz E, H., Mosquera G, J. & Benavides, O. (2012). Efecto de cinco sistemas de labranza en la erosión de un suelo vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2): 116 - 128.
- Camacho, M., Mata, R. & Forsythe, W. (2015). Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas. *Agronomía Costarricense*, 39(3): 101-115.
- Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 777-783.
- Cardona, W. A., Bolaños Benavides, M. M., & Chavarriaga Montoya, W. (2015). Efecto de fertilizantes químicos y orgánicos sobre la agregación de un suelo cultivado con *Musa acuminata* AA. *Acta Agronómica*, 65(2), 144-148.
- Cavallini, M. C., Andreotti, M., Lisbôa, L., Magalhães Pariz, C. & De Passos e Carvalho, M. (2010). Relações entre produtividade de *brachiaria brizantha* e atributos físicos de um latossolodo cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 34: 1007-1015.

- Ceballos, D., Hernández I, O. & Velez L, J. (2010). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del departamento de nariño. *Revista de agronomía*, 17(1), 40-48.
- Cerdas, R., & Vallejos, E. (2012). Comportamiento productivo de varios pastos tropicales a diferentes edades de cosecha en Guanacaste, Costa Rica. *InterSedes*, 13(26).
- Cuenca, R. (2019). Evaluación de la mineralización de biochar sobre parámetros químicos del suelo en dos tiempos de incubación. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(3), 6-11.
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., ... Wander, M. M. (2012). Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494-504.
- Demuner, G., Cadena, M., Campos, S. G., Zermeño, A. & Sánchez, F. D. (2014). Efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y radicular. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 123-130.
- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C., & Mata, R. (2015). Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 39(1), 37-46.
- Frolla, F. D. (2016). Efecto del pastoreo bovino sobre propiedades físicas del suelo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Universidad Nacional del Mar de la Plata. Balcarce, Argentina*. Recuperado de <http://repositorio.inta.gob.ar:80/handle/20.500.12123/1605>
- Hurisso, T. T., Culman, S. W., Horwath, W. R., Wade, J., Cass, D., Beniston, J. W., ... Ugarte, C. M. (2016). Comparison of Permanganate-Oxidizable Carbon and Mineralizable Carbon for Assessment of Organic Matter Stabilization and Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1352-1364.
- López-Garrido, R., Díaz-Espejo, A., Madejón, E., Murillo, J. M., Moreno, F., & Moreno, F. (2009). Carbon losses by tillage under semi-arid Mediterranean rainfed agriculture (SW Spain). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(3), 706-716.

- Martinez, D., Landini, A., Soza, E., Heredia, O. & Sainato, C. (2010). Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo: densidad aparente, humedad, resistencia a la penetración, y modelos asociados. *Agro-Ciencia, Rev. Chil. Cs. Agropec*, 27(1): 5-14.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., Silva, P., Valle, S. & Acevedo, E. (2008). Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil & Tillage Research*, 99: 232–244.
- Martinez, J., Noguera, N., Peters, W. M., Clavero, T. & Casanova, A. (1992). Efecto de la compactación del suelo sobre la producción de forraje en pasto Guinea (*Panicum maximum* Jacq). *Fac. Agron. (LUZ)*, 9: 97-108.
- Martínez, L. J., & Zinck, J. A. (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil & Tillage Research*, 75: 3-17.
- Mehuys, G., Tiessen, K., Villatoro, M., Sancho, F. & Lobb, D. (2009). Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2): 205-215.
- Mijangos, I., Pérez, R., Albizu, I., & Garbisu, C. (2006). Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(1), 100-106.
- Montanari, R., De Souza Lima, E., Lover, L. H., Henrique, A. F., Rios Godoy, L. T. & Dalchiavon, F. C. (2013). Correlación de la productividad de un forraje con las propiedades físicas de un Ultisol en Aquidauana. *Revista Ceres*, 60, 102-110
- Montanari, R., De Passos e Carvalho, M., Andreotti, M., Dalchiavon, F. C., Lovera, L. H. & De Oliverira Honorato, M. A. (2010). Aspectos da produtividade do Feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(6): 1811-1822.
- Morales J, Acuña V, Cruz A. (2006). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y valor nutritivo del pasto transvala (*Digitaria decumbens* cv. Transvala) para henificación, bajo condiciones de riego. *Alcances tecnológicos*, 4, (1),45-51.

- Ohep, C., Marcano, F. & Sivira, O. (1998). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata* L. walp) en el Yaracuy medio. *Bioagro*, 10(3): 68-75.
- Ohep, C., Marcano, F., & Rangel, L. (1994). Efecto de la labranza sobre algunas características físicas del suelo y la producción del maíz en el Yaracuy. *Bioagro*, 6(3): 77-96.
- Olmo Prieto, M. (2016). Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. (Doctoral dissertation, Universidad de Córdoba (ESP)). Recuperado de <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13381>
- Pietola, L.; Horn, R.; Yli-Halla, M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and Tillage Research*. 82(1): 99-108.
- Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O. A. & Méndez-Marzo, M. A. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, Mexico. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 83-91.
- Ramos, A., & Alessandra, C. (2019). Optimización de la agricultura sostenible mediante el uso del biocarbón en el Perú. Universidad Científica del Sur. <https://doi.org/10.21142/tb.2020.1363>.
- Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Pacheco, E. V., & Barra, J. D. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Revista terra latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- Rivera Vázquez, J.M; Carfagno, P & Eliza, M.J. (2017). Efecto de la inclusión de cultivos de cobertura sobre la porosidad de un suelo Hapludol del oeste de la provincia de Buenos Aires. *Fac. Agronomía y Cs Agroalim. UM*, 8, 31-45.
- Rodríguez, M. 1998. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento de maíz en los llanos altos del estado Monagas, *Agron. Trop.* 48 (2): 157-174.

- Roque Garcia. (2015). Efecto de sistemas de labranza en propiedades físicas del suelo y desarrollo radicular del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* W.). *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 18(35): 109-113.
- Salvo, L., Hernández, J., & Ernst, O. (2010). Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 116-122.
- Santana, L., Masaguer, A. & Baldoquin, A. (2014). *Efecto de sistemas de labranza en luvisoles dedicados a la producción de pastos*. Madrid : *Universidad Politecnica de Madrid*, España .
- Schnabel, S. C. (1997). Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain. España: Logroño: Geoforma.
- Sadeghian K., S. (2004). Efecto de la fertilización con nitrógeno fósforo potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé*, 54(3), 242-257.
- Tecnológicos, A. (2019). La Industrialización del heno de alta calidad en Costa Rica. *Alcances Tecnológicos*, 4(1), 2.
- Tesouro, O., Romito, A., Amico, J., Roba, M. & Pollacino, J. (2013). Labranza vertical: Efecto sobre un suelo compactado y el rendimiento de un ciclo trigo - maíz. Buenos Aires : *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)* .
- Tormena, C. A., da Silva, A. P., & Libardi, P. L. (1999). Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52(3), 223-232.
- Vallejos, A., Kees, M., Bondia , P., Echeverria, N., Silenzi, J. & Zajac, C. (2014). Subsulado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del suelo*, 32(2), 291-300.
- WingChing-Jones, R., & Uribe, L. (2016). Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8, 107-116.



- WingChing-Jones, R., Cabalceta, G. & Alvarado, A. (2009). Impacto del pastoreo con ganado holstein y jersey sobre la densidad aparente de un andisol. *Agronomía Mesoamericana*, 20(2): 371- 379.
- Zambrano, G., Apraez, J. & Navia, J. (2014). Relación de las propiedades del suelo con variables bromatológicas de pastos, en un sistema lechero de Nariño. *Revista de ciencias agrícolas*, 31 (2): 106 - 121.

**Capítulo 2. Evaluación de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la dinámica del C orgánico y la actividad microbiana del suelo cultivado con pasto de corta Transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.**

**RESUMEN**

El carbono orgánico y actividad microbiana del suelo resultan esenciales para el mantenimiento de sus propiedades y la sostenibilidad de los agroecosistemas. Además, representan una alternativa como indicadores para evaluar la calidad del suelo y los efectos de su manejo. En este estudio se evaluó el efecto de la labranza y enmiendas de cal y compost sobre la dinámica del carbono orgánico, comparando carbono total ( $C_{total}$ ) y carbono activo ( $C_{oxp}$ ) y la actividad microbiana del suelo en un sistema de producción de pasto transvala de corte (*Digitaria decumbens* Stent.). Las variables fueron evaluadas 78, 173 días después de la aplicación de los tratamientos y una evaluación adicional a los 263 días para el caso del  $C_{oxp}$ . Los tratamientos consistieron en Subsolador, Palín Mecánico, Descompactador, Subsolador+Enmienda, Palín Mecánico+Enmienda, Descompactador+Enmienda y un Tratamientos Control. Los mayores valores de  $C_{oxp}$  se observaron en los tratamientos con enmienda en todas las fechas de muestreo, a excepción del Subsolador+Enmienda, que mostró una reducción significativa a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. El  $C_{total}$  no presentó diferencia significativa entre los tratamientos en ninguno de los periodos de muestreo. De acuerdo al tamaño del efecto todos los tratamientos con enmienda incrementaron la tasa de respiración comparados con el Control en todas las fechas de muestreo, a excepción del Palín Mecánico+Enmienda, no así para el caso de los tratamientos sin enmienda, los cuales mostraron una reducción significativa a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Los mayores valores de biomasa microbiana se encontraron en los tratamientos de solo labranza a los 78 días, sin embargo, estas diferencias desaparecieron a los 173 días. El carbono activo demostró ser una variable mucho más sensible que el carbono total, por lo que, podría considerarse como un indicador de calidad de suelos que puede generar información temprana sobre los efectos del manejo sobre el carbono orgánico de suelo.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas ganaderos en Costa Rica representan una importante contribución a la actividad económica y seguridad alimentaria del país. Pese a su relevancia, es muy notable el deterioro de los recursos naturales, de los cuales depende la sostenibilidad de esta actividad (Camacho et al., 2015). Estos sistemas, a su vez, enfrentan el desafío de satisfacer la creciente demanda de alimentos, en un contexto de cambio climático y pérdida de la fertilidad de los suelos a nivel mundial (Aquiye Ramos, 2019).

Como consecuencia, se intensifica el uso de la fertilización química, lo cual, representa una respuesta incompleta ante la degradación de los suelos y sus efectos en la reducción de los contenidos de carbono orgánico, sobre todo, en áreas dedicadas a la ganadería (Rivera et al., 2019). Ante este escenario, el sector ganadero resalta su importancia como gran contribuyente de emisiones de gases de efecto invernadero, que, debido a sus sistemas de manejo, han conllevado a procesos que aceleran la mineralización del carbono orgánico del suelo y que, por efecto de la oxidación, ha sido liberado a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> (Olmo Prieto, 2016).

Por otro lado, Zhou et al. (2016) afirman que los efectos de la ganadería están en función del periodo y la densidad del pastoreo, siendo uno de los principales criterios de gestión en el incremento o reducción del carbono orgánico del suelo. Estudios han demostrado que existe una relación positiva entre densidad de pastoreo y acumulación de carbono orgánico en condiciones de pastoreo tanto rotativo como continuo (Conant et al., 2003). A su vez, los sistemas integrados de cultivo y ganadería poseen un alto potencial de mitigación de las pérdidas de carbono orgánico del suelo afectando de manera positiva su dinámica mediante la modificación de la producción de la biomasa subterránea, actividad biológica y acumulación de carbono lábil (Brewer & Gaudin, 2020).

El uso de enmiendas orgánicas ha sido implementado como medida de mitigación de la degradación del recurso suelo, que generalmente se expresa en limitaciones nutricionales, principalmente por los bajos contenidos de nitrógeno, el cual es un elemento que se considera escaso en los suelos dedicados a la ganadería y que está directamente asociado con el reciclaje de carbono orgánico (Rebolledo et al., 2016). Otras propiedades del suelo

como la estructura y el reciclaje de nutrientes también dependen en gran medida del carbono orgánico y la actividad microbiana (Cardona et al., 2015). Por ello, la biomasa microbiana tiene gran influencia en los procesos de descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes, además de ser el principal componente en el desarrollo de la estructura y estabilidad mecánica del suelo (Brookes et al., 2008).

Los suelos dedicados a la ganadería con un manejo sostenible tienden a presentar mayor biomasa microbiana y carbono orgánico, el cual está influenciado por el sistema de pastoreo y depende de la cobertura vegetal y suministro de materia orgánica (Waters et al., 2017). El aporte constante de C por medio de la acumulación de raíces y por las excretas del ganado (WingChing-Jones & Uribe, 2016; Fornara & Tilman, 2008) explican esta tendencia directamente asociados al C del suelo (Durango et al., 2015). También, se ha demostrado que la implementación de sistemas de pastoreo rotativo moderado, incorporando tiempos de descanso entre ocupación corta e intensiva permite el incremento del carbono orgánico del suelo (Assmann et al., 2014; Waters et al., 2017).

El carbono orgánico es una de las variables más frecuentemente estudiadas como indicador de la calidad del suelo y de la sostenibilidad de las actividades agropecuarias, puesto que afecta muchas propiedades del suelo (Salvo et al., 2010). Sin embargo, el carbono orgánico no es homogéneo en términos estructurales, ya que se compone de diversas sustancias que varían en sus características químicas y físicas, y que a su vez presentan distintas tasas de descomposición (Martínez H et al., 2008) y tiempos de residencia en el suelo (Bronick & Lal, 2005). Por lo tanto, la medición del carbono total ( $C_{tot}$ ), aunque es muy usada a nivel mundial, no es un indicador sensible al efecto del manejo del suelo a corto plazo (Cambardella & Elliott, 1992; Weil et al., 2003).

El carbono oxidable con permanganato de potasio ( $C_{oxp}$ ), ha sido relacionado a formas particuladas pequeñas (53–250  $\mu\text{m}$ ) y pesadas (fracción ocluida  $>1,7 \text{ g cm}^{-3}$ ) del C orgánico del suelo, estas formas de C son más sensibles a cambios en el manejo y representan una metodología rápida y económica de medir, y a su vez permite identificar cambios tempranos en la reserva de C del suelo (Culman et al., 2012). Aunque el  $C_{oxp}$  solo representa una pequeña fracción (5-20%) del total de materia orgánica del suelo, repercute de manera significativa en sus funciones, entre las cuales se puede mencionar el reciclaje de

nutrientes y su disponibilidad para las plantas y la formación de estructura edáfica (Cambardella & Elliott, 1992). En este estudio se evaluó el efecto de la labranza mecanizada y el uso de enmiendas sobre el carbono orgánico del suelo, utilizando dos parámetros, el  $C_{tot}$  y el  $C_{oxp}$ , con el fin de estimar cuál de estos, muestra mayor sensibilidad al manejo y expresa cambios a corto plazo.

En su gran mayoría, los estudios sobre producción de forraje en Costa Rica están dirigidos principalmente a la respuesta de estos a la aplicación de fertilizantes sintéticos, donde se evalúa únicamente la producción de biomasa (Araya & Boschini, 2005). Tomando en cuenta que las prácticas en las que se combina el uso de enmiendas y sistemas de labranza, presentan mejoras en calidad biológica e incremento en los contenidos de carbono orgánico (Mijangos et al., 2006), se propuso en este estudio evaluar el efecto de la labranza mecanizada y el uso de enmiendas sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo y la actividad microbiana. Se utilizó una metodología reciente para estimar el carbono lábil o carbono activo del suelo, como carbono oxidable con permanganato de potasio ( $C_{oxp}$ ).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una finca dedicada a la producción ganadera, ubicada en Labrador de San Mateo de Alajuela (9°56'01"N 84°37'59"O), perteneciente a la región del Pacífico Central de Costa Rica, en la cuenca del Río Jesús María, con una altitud de 254 msnm (Piedra Quesada, 2017). El sitio se caracteriza por un régimen de humedad Ústico, con un periodo seco con duración aproximada de 4 a 5 meses y otro lluvioso que dura aproximadamente 8 meses, con una precipitación media anual de 2637 mm. La temperatura media anual es de 26°C (Solano & Villalobos, 2012). El suelo en el sitio de estudio es un Ustic Palehumults, según su clasificación taxonómica del sistema USDA, los cuales son antiguos, meteorizados, con contenidos de arcilla altos, ricos en materia orgánica y de régimen de humedad Ústico (o con época seca marcada) (Camacho, 2015).

### Diseño del Experimento

El experimento se estableció en un área de 2405 m<sup>2</sup>, donde se ubicaron 28 sub-parcelas o unidades experimentales con dimensiones de 3 x 10 m (30 m<sup>2</sup>). Con un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos por bloque más un control, repetido en 4 bloques. Los tratamientos consistieron en labranza mecanizada de suelo utilizando tres implementos: Palín Mecánico, Descompactador y Subsolador, más un Control. Además, se utilizó una enmienda de tipo orgánico o compostado a base de gallinaza (Cuadro 1), en combinación con CaCO<sub>3</sub> (Cuadro 2). En total se aplicaron seis tratamientos más un control sin labranza y sin enmiendas (Cuadro 3).

Cuadro 1. Características físicas y químicas del compost a base de gallinaza.

% masa								
C	MO	Humedad	N	P	Ca	Mg	K	S
16,40	23,45	26	2,53	2,17	3,66	0,69	2,48	0,52
mg/kg						Relación	H <sub>2</sub> O	mS/cm
Fe	Cu	Zn	Mn	B	C/N	pH	CE	
36391	144	568	1388	37	6,5	7,8	20,8	

Cuadro 2. Características químicas y granulométricas del material de encalado.

PUREZA QUÍMICA						% PRNT	
% Humedad	% masa/masa						% EQ
	Ca	Mg	S	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>		
0,2%	39,3	0,1		98,3	0,4	98,8	
GRANULOMETRÍA						98,7	
# de malla	10	20	40	60	> 60		% EG
% de material	0,0	0,0	0,0	0,2	99,8		
% de efectividad	0,0	0,0	0,0	0,1	99,8	99,9	

EQ: Equivalente químico; EG: Efectividad granulométrica; PRNT; Poder relativo de neutralización total

Cuadro 3. Tratamientos de labranza mecanizada y enmienda orgánica y calcárea.

Tratamientos	Profundidad de trabajo (cm)	Separación entre órganos de labor (cm)	Compost (t/ha)	CaCO <sub>3</sub> (t/ha)
Subsolador	40	65		
Palín Mecánico	15	25		
Descompactador	20	39		
Subsolador+Enmienda	40	65	7,33	2
Palín Mecánico+Enmienda	15	25	7,33	2
Descompactador+Enmienda	20	39	7,33	2
Control				

### Muestreo de suelos

Los periodos de muestreo se ajustaron a las dos primeras fechas de corte del pasto establecidas por el productor. A los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos, para el caso del C<sub>oxp</sub> se realizó un tercer muestreo a los 263 días después de la aplicación de los tratamientos. Se tomaron 4 muestras al azar por cada uno de los tratamientos a una profundidad de 10 cm, estas muestras fueron colocadas en bolsas plásticas y posteriormente llevadas al laboratorio para su debido análisis.

## VARIABLES EVALUADAS

*Carbono y Nitrógeno total (C<sub>tot</sub>):* Fueron determinados con un autoanalizador de C-N (Marca Elemental, modelo Vario MacroCube), mediante la técnica de combustión seca. Este análisis se realizó en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA-UCR).

*Carbono activo (C<sub>oxp</sub>):* El carbono activo o carbono oxidable con permanganato de potasio (C<sub>oxp</sub>) cuantifica el C lábil del suelo. La técnica de medición consiste en agitar 2,5 g de suelo seco en 20 mL de KMnO<sub>4</sub> 0,02 M en un tubo de centrífuga de polipropileno de 50 mL. La extracción se hace agitando en un agitador horizontal Eberbach por 2 min. a 240 oscilaciones por min. El extracto se deja asentar por 10 min y se diluye en agua desionizada en una razón de 1:100 (por ejemplo, 0,5 mL + 49,5 mL) en otro tubo de ensayo. La absorbancia de la solución fue leída en un espectrofotómetro de UV visible marca Hanon, modelo I3 a 550 nm en el Laboratorio de Recursos Naturales del CIA-UCR. El contenido de C<sub>oxp</sub> se determinó con la siguiente fórmula:

$$C_{oxp} = [0,02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \text{ Abs})] \times [9000 \text{ mg C } \llbracket \text{mol} \rrbracket^{-1}] \times [0,02 \text{ L/peso}]$$

Donde,

0,02 mol L<sup>-1</sup> = concentración inicial del KMnO<sub>4</sub>.

a = intercepto de la curva de estándar usada.

b = pendiente de la curva estándar.

Abs = absorbancia de la muestra.

9000 mg = cantidad de C que se oxida por un mol de KMnO<sub>4</sub> (Mn<sup>7+</sup> se reduce a Mn<sup>4+</sup>).

0,02 L = volumen de la solución que reacciona con el suelo, y peso es la cantidad de suelo usado (kg).

*Relación C/N:* Como índice de calidad del componente orgánico del suelo, la relación C/N. Altos valores indican, que la materia orgánica se mineraliza de forma lenta, tomando en cuenta que la microbiota del suelo lleva a cabo un proceso de inmovilización del nitrógeno,



por lo que dicho material no será muy útil en la nutrición vegetal dado a su baja disponibilidad de nitrógeno. Por otro lado, valores relativamente bajos (10 -14) implican una rápida descomposición del componente orgánico, puesto que los microorganismos se ven estimulados, en otras palabras, relaciones bajas de C/N implican una mayor eficiencia por parte de los microorganismos al degradar la materia orgánica (Gamarra Lezcano et al., 2018). Este parámetro se obtiene de dividir el carbono total entre el nitrógeno total.

*Materia Orgánica (%):* Para estimar el valor de Materia Orgánica (MO) a partir del dato de % C total, se multiplicó el % C total por 1,43 (metodología del laboratorio de suelos y foliares (LSF)-CIA-UCR. Agosto-2021) otros autores indican que  $MO = C_{org} \times 2$ .

*Biomasa Microbiana:* Este parámetro se determinó utilizando el método de fumigación-extracción descrito por Vance, Brookes & Jenkinson, (1987), siguiendo los procedimientos sugeridos por Durango et al. (2015). En el cual se tomaron 10 g de muestra en un beaker de 40 ml, se realizó la fumigación con cloroformo y se dejó incubar por 24 h. Posteriormente, se agregó 50 mL de  $K_2SO_4$  (0,5M), esto fue agitado por 30 min y luego fue filtrado para obtener un extracto. Luego se colocaron 8 ml en tubetes para digestión, seguido se agregaron 2 ml de  $K_2Cr_2O_7$  (66,7 mM), 70 mg de HgO y 15 ml de mezcla ácida (2v  $H_2SO_4$  (98%) y 1v  $H_3PO_4$  (88%) por 30 minutos y fueron reposadas. Luego se trasladaron a otro recipiente de 250 ml, se agregaron 80 ml de agua destilada y se adicionaron 3 gotas de fenontralina para luego evaluar el exceso de  $K_2Cr_2O_7$  con sal de Morh 33,3 mM  $(NH_4)_2.Fe(SO_4)_2,6(H_2O)$ .

*Actividad Microbiana:* Se evaluó en base al método descrito por Durango et al. (2015). La cual consistió en pesar 10 g de muestra y colocarla en un recipiente de incubación con un recipiente de 10 ml de agua al igual que otro con 10ml de NaOH (1M) dejándolos reposar por 4 días. Para luego determinar el  $CO_2$  absorbido en el NaOH, para ello se adicionó 10 ml de BaCl y fue transferido a un erlenmeyer al cual se le agregó 3 gotas de fenolftaleína para luego ser titulado con HCl (0,5M). Finalmente se repitió el proceso a los 8 días.

### **Análisis de datos**

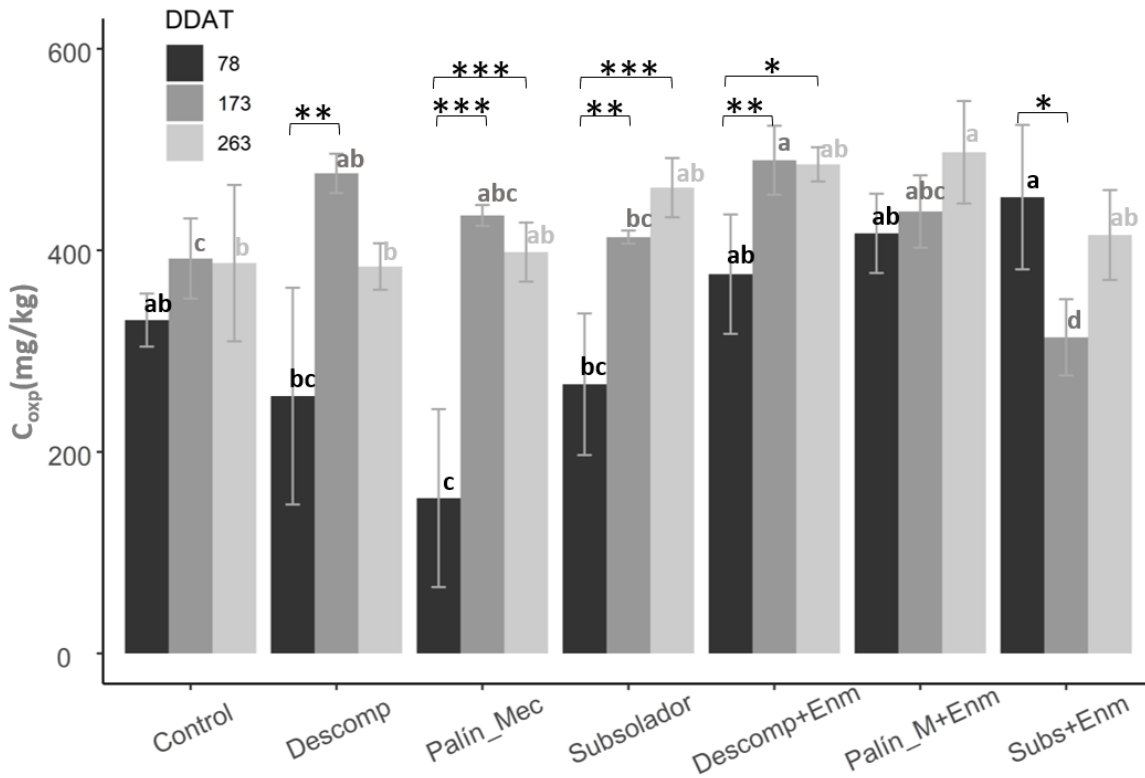
Los datos se analizaron con el software estadístico R (RStudio) versión 1.3.1073 (© 2009-2020 Rstudio, PBC). Se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuales, homogeneidad de la varianza y ausencia de valores atípicos en los datos. De cumplir con los supuestos, posteriormente se realizó un análisis de varianza de dos vías (ANDEVA) con la función `aov()`, para determinar si existía interacción entre tratamientos y fechas de muestreo. En caso de encontrar diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey) con la función `tukeyHSD()`, por tratamientos entre fechas de muestreo y entre tratamientos por fechas de siembra. El tamaño del efecto fue analizado con un modelo lineal general con la función `lm()`, con la variable respuesta en función de los tratamientos por fecha de muestreo.

## RESULTADOS

### **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas en la dinámica del carbono orgánico**

#### *Carbono activo*

La labranza mecanizada y la aplicación de enmiendas presentaron un efecto marcado en el carbono activo ( $C_{oxp}$ ) del suelo. Al evaluar el comportamiento del  $C_{oxp}$  a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, aquellos tratamientos que incluyeron enmienda, tuvieron efecto positivo en el incremento del  $C_{oxp}$  comparados con los tratamientos sin enmiendas, presentando un incremento significativo, especialmente en el tratamiento Subsolador+Enmienda que obtuvo el valor más alto con 469 mg/kg, (Figura 1). Por otro lado, la remoción del suelo con los implementos utilizados en este experimento, tiene un efecto negativo en el contenido de  $C_{oxp}$ . De manera general, los tratamientos de solo labranza mostraron una importante disminución del  $C_{oxp}$  en relación con el control, sin embargo, el palín mecánico fue el único que presentó una reducción significativa ( $p<0,03$ ) de  $C_{oxp}$  en comparación con el control (Figura 1B). Este patrón de comportamiento cambió en función del tiempo de aplicación de los tratamientos. A los 173 días se presentó un incremento del  $C_{oxp}$  para todos los tratamientos a excepción del Subsolador+Enmienda, en el cual se observó una reducción ( $p<0,05$ ) en comparación con los demás tratamientos y con los valores encontrados a los 78 días en este mismo tratamiento. Por otro lado, el Descompactador+Enmienda y el Descompactador mostraron los mayores valores, siendo estos significativos en comparación con el Control. A medida que transcurrió el tiempo las diferencias de  $C_{oxp}$  fueron menos marcadas entre tratamientos, ya que el único tratamiento que presentó una diferencia significativa con los demás tratamientos fue el Palín Mecánico+Enmienda.



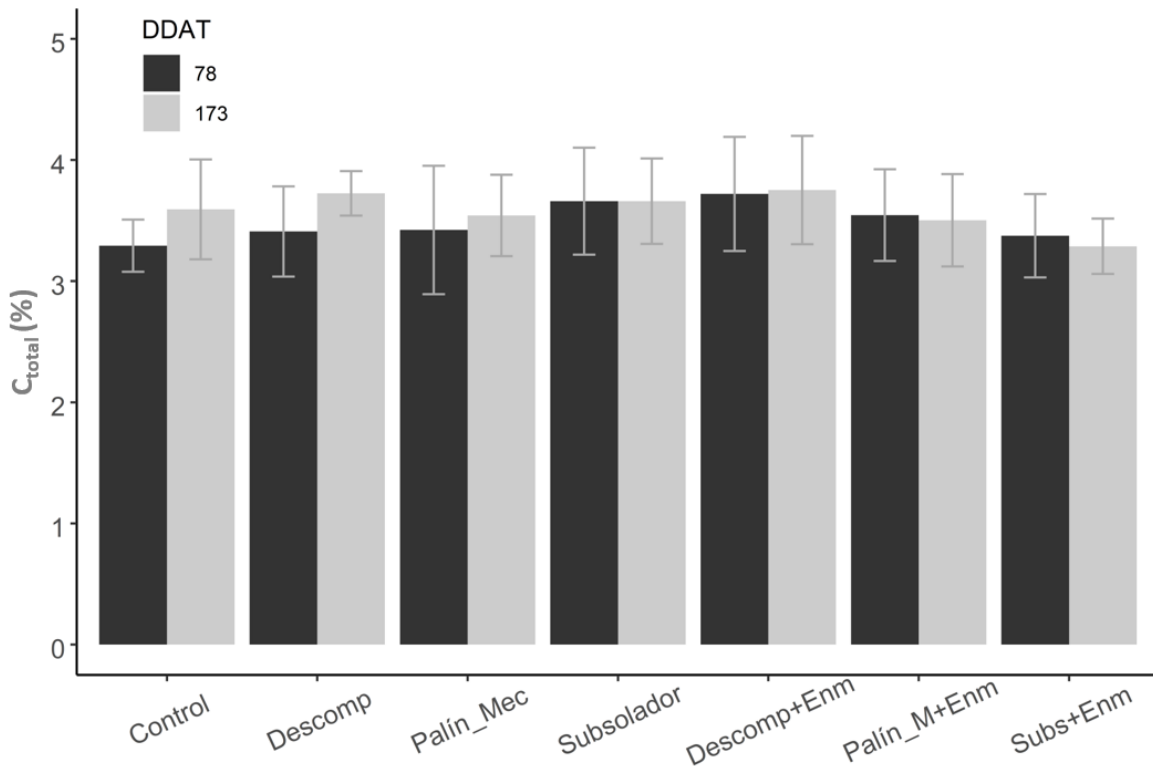
$C_{oxp}$ : Carbono activo; DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; (\*):  $p < 0,05$ , (\*\*):  $p < 0,01$ , (\*\*\*) :  $p < 0,001$ .

**Figura 1.** Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre el Carbono activo del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos. Las barras de error indican intervalos de confianza. Letras distintas del mismo color indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. Los asteriscos indican diferencias significativas honestas de Tukey por tratamientos entre fechas de muestreo.

#### *Carbono total*

Por otra parte, al evaluar el efecto de los tratamientos sobre el carbono orgánico total ( $C_{tot}$ ), no se observó una clara diferencia entre tratamientos en las fechas de muestreo 78 y 173 días después de la aplicación de la labranza. A los 78 días no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Este comportamiento se repite a los 173 donde tampoco se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Por lo que este

parámetro no expresó diferencias significativas entre tratamientos por fecha de muestreo, ni entre fechas de muestreo por tratamiento (Figura 2).



$C_{tot}$ : Carbono total; DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; (\*):  $p < 0,05$ , (\*\*):  $p < 0,01$ , (\*\*\*):  $p < 0,001$ .

**Figura 2.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre el Carbono total del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Las barras de error indican intervalos de confianza. Letras distintas del mismo color indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. Los asteriscos indican diferencias significativas honestas de Tukey por tratamientos entre fechas de muestreo.

## **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la actividad y biomasa microbiana**

### *Tasa de respiración*

Los datos de respiración se expresaron en función del tamaño del efecto por medio de un modelo lineal general por fecha de muestreo, para evaluar la diferencia obtenida entre los tratamientos comparados con el control (intercepto). Los resultados obtenidos a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a un nivel de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ), muestran que el verdadero parámetro de tasa de respiración microbiana para el caso del tratamiento control, se encuentra entre 37,77 y 65,22 mg C-CO<sub>2</sub>/kg/ día, con un estimado de punto o media general de 51,50 mg C-CO<sub>2</sub>/kg/día (Cuadro 4A). Para el caso del tratamiento Descompactador+Enmienda, es 11 mg C-CO<sub>2</sub>/kg/día mayor que el control y que los tratamientos subsolador con y sin enmienda son 17,25 y 11,50 mg C-CO<sub>2</sub>/kg respectivamente mayores que el control. Palín Mecánico presentó el valor más bajo de este parámetro, con 10 mg C-CO<sub>2</sub>/kg/día menos que el control. Ninguno de los tratamientos mostró diferencia significativa con respecto al control (Cuadro 4B), ya que se muestra que los intervalos de confianza se superponen a la línea del intercepto (0). A los 173 días la tasa de respiración para el tratamiento control (intercepto) refleja un incremento, alcanzando 98,25 mg C-CO<sub>2</sub>/kg/día. En este punto los únicos tratamientos que presentan un efecto positivo son el Descompactador+Enmienda y el Subsolador+Enmienda (Cuadro 4A). Por el contrario, los tratamientos de solo labranza presentaron reducción significativa sobre la tasa de respiración comparados con el control (Cuadro 4C).

De igual manera la tasa de respiración fue evaluada a través de un análisis de varianza (ANDEVA) por fecha de muestreo para evaluar diferencias entre tratamientos. De acuerdo con los resultados obtenidos, a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos no se observó diferencia significativa entre tratamientos (Figura 3). Luego de un periodo de 173 días los tratamientos con enmienda mostraron valores significativamente mayores ( $p<0,05$ ) que los tratamientos sin labranza, no así con el tratamiento control. Los tratamientos de solo labranza con los implementos utilizados en este estudio generaron una reducción significativa de la tasa de respiración.

**Cuadro 4.** Tamaño del efecto de los tratamientos sobre la tasa de respiración microbiana en función del control a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.

A	Parámetros	78DDAT		173DDAT	
		Coefficiente	Error Estándar	Coefficiente	Error Estándar
	Control(Intercepto)	51,5	6,6	98,25	6,78
	Descomp	-6,25	9,33	-31,25	9,58
	Descomp+Enm	11	9,33	19,75	9,58
	Palín_M+Enm	0,25	9,33	-2,75	9,58
	Palín_Mec	-10	9,33	-51,5	9,58
	Subs+Enm	17,25	9,33	5,5	9,58
	Subsolador	11,5	9,33	-45,5	9,58

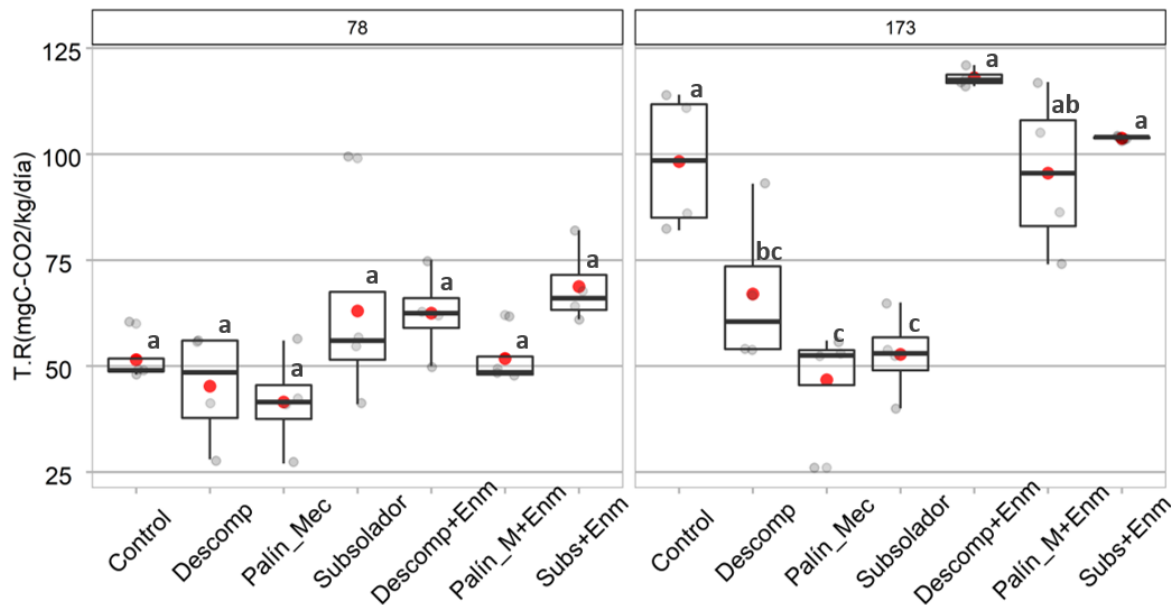
**B**

T.R.(mgC-CO<sub>2</sub>/kg/día) en relación al control

**C**

T.R.(mgC-CO<sub>2</sub>/kg/día) en relación al control

T.R: tasa de respiración; DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Descomp: Descompactador; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; CI: intervalo de confianza. Barras de error indican intervalos de confianza. B y C Forest plot del tamaño del efecto a los 78 y 173 días respectivamente después de la aplicación de los tratamientos. Intervalos de confianza que se superponen a la línea del intercepto (o) indica que no hay diferencia significativa con respecto al control.



T.R: tasa de respiración; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador.

**Figura 3.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la tasa de respiración microbiana del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Letras distintas indican diferencias significativas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. El punto rojo indica la media.

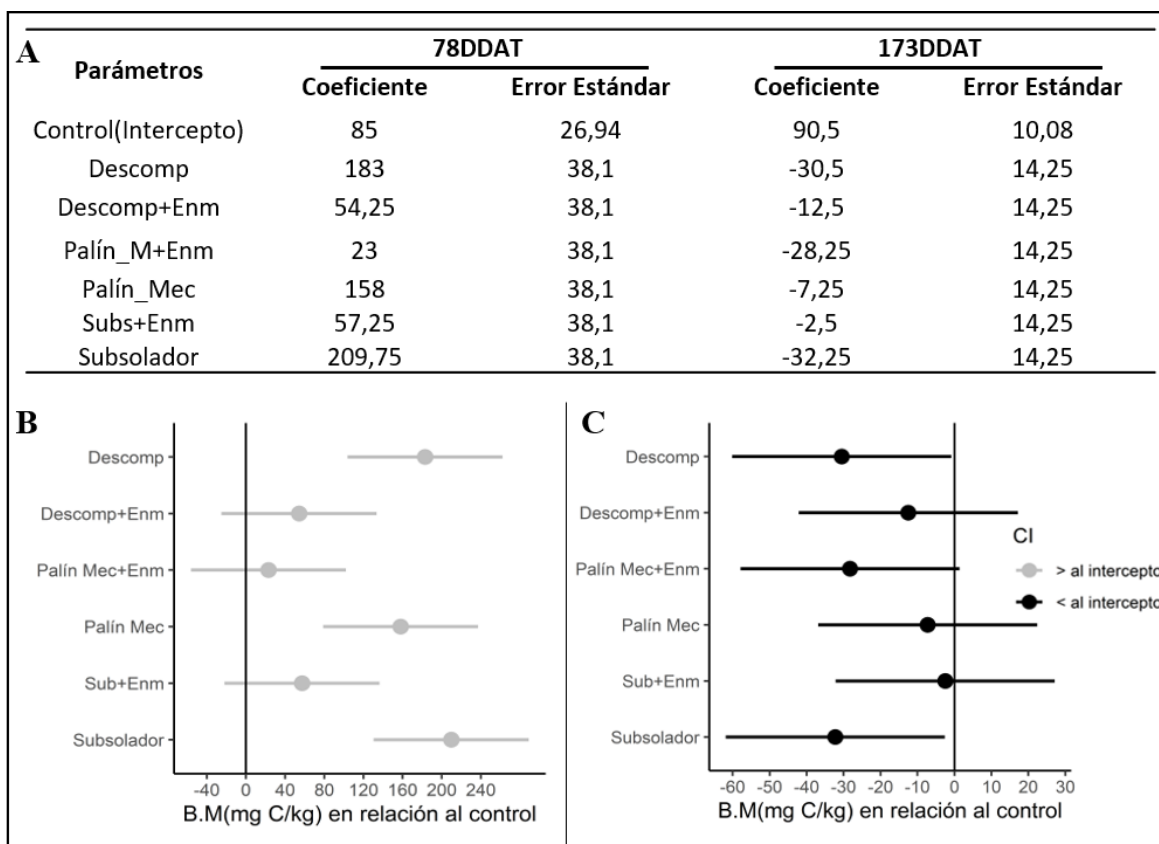
#### *Biomasa microbiana*

De acuerdo con la evaluación del tamaño del efecto a 95% de confianza ( $\alpha=0,05$ ), el verdadero parámetro de biomasa microbiana para el caso del control a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos se encuentra entre 28,97 y 141,02 mg C/kg, con un estimado de punto o promedio de 85 mg C/kg (Cuadro 5A). Para el caso específico de los tratamientos Descompactador, Palín Mecánico y Subsolador, fueron 183, 158 y 209,75 mg C/kg respectivamente mayores y estadísticamente diferentes que el control (Cuadro 5B). Sin embargo, todos los tratamientos presentaron un efecto positivo en la biomasa microbiana. Todo lo contrario, sucedió a los 173 días, donde todos los tratamientos expresaron un efecto negativo en la biomasa microbiana. Los tratamientos que presentaron diferencia estadística fueron el Descompactador y Subsolador (Cuadro 5C).

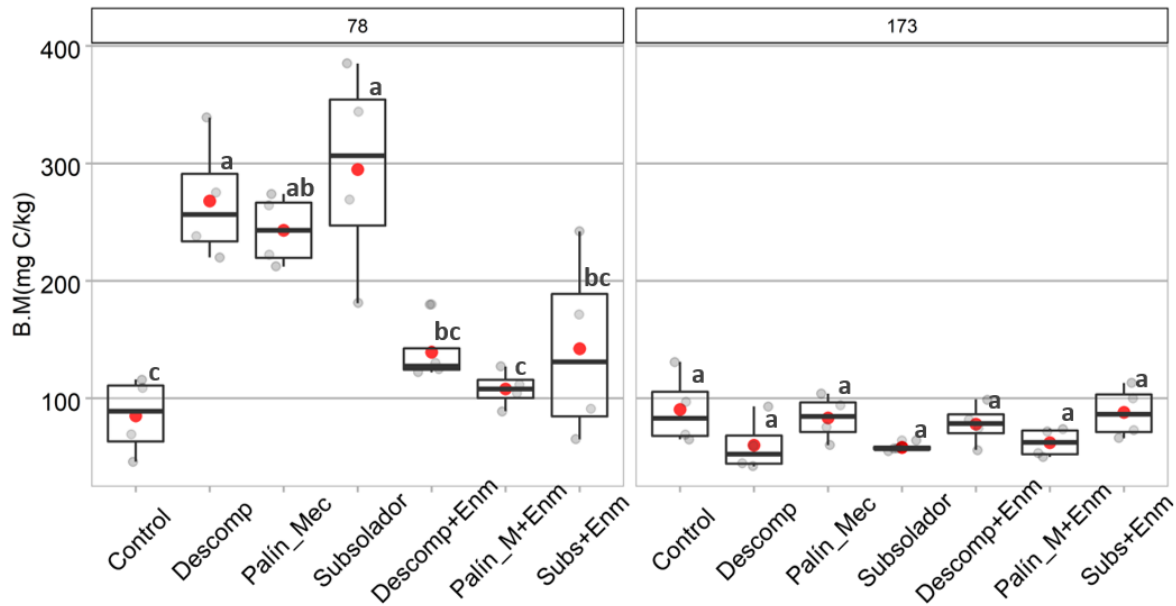


De igual manera la biomasa microbiana fue evaluada a través de un análisis de varianza (ANDEVA) por fecha de muestreo para evaluar diferencias entre tratamientos. De acuerdo con los resultados obtenidos, a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, la utilización de los implementos sin enmienda favoreció la biomasa microbiana, ya que estos tratamientos presentan valores mayores ( $p < 0,05$ ) comparados con los tratamientos con enmienda y el control (Figura 4). En este caso los tratamientos con biomasa microbiana más alta fueron el Subsolador y Descompactador; por el contrario, los tratamientos con biomasa microbiana más baja fueron el Control y Palín Mecánico+Enmienda. A los 173 días estas diferencias desaparecieron, ya que no se observó diferencia entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, se observó una reducción de la biomasa microbiana de todos los tratamientos en comparación con los valores encontrados a los 78 días, excepto el control (Figura 4).

**Cuadro 5.** Tamaño del efecto de los tratamientos sobre la biomasa microbiana en función del control a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.



B.M: biomasa microbiana; Descomp: Descompactador; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; CI: intervalo de confianza. Barras de error indican intervalos de confianza. B y C Forest plot del tamaño del efecto a los 78 y 173 días respectivamente después de la aplicación de los tratamientos. Intervalos de confianza que se superponen a la línea del intercepto (o) indica que no hay diferencia significativa con respecto al control.



B.M: biomasa microbiana; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador.

**Figura 4.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la biomasa microbiana del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Letras distintas indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. El punto rojo indica la media.

## DISCUSIÓN

### **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas en la dinámica del carbono orgánico del suelo**

El suelo y sus propiedades cambian en respuesta a los sistemas de manejo y la alteración de sus condiciones, especialmente las propiedades microbiológicas y carbono orgánico, cuya relación con el flujo de energía y el ciclo de nutrientes es de especial importancia para el manejo de los agroecosistemas. Estas propiedades muestran cambios relativamente rápidos e informativos sobre la calidad del suelo y el efecto de los distintos sistemas de manejo (Paolini Gomez, 2018).

Los valores más altos de  $C_{oxp}$  a los 78 días correspondieron a los tratamientos de labranza con la adición de enmienda en relación con los tratamientos de solo labranza. Estos hallazgos podrían deberse a que la enmienda utilizada (compost a base de gallinaza) es rica en carbono orgánico (16,40 %) poco descompuesto, cuyos materiales constituyentes y formas más lábiles aun forman parte de este material y que al ser incorporados al suelo contribuyeron formas de carbono orgánico de fácil mineralización. Estos resultados son consistentes con estudios realizados por Comese et al. (2009) en los que se evaluó la aplicación de distintos tipos y cantidades de enmienda orgánicas y su efecto en el carbono orgánico del suelo, en el cual el lombricompost obtuvo los mayores valores de carbono orgánico comparado con los tratamientos a los cuales no se les aplicó enmienda. De igual forma Olchin et al. (2008), afirman que el incorporar residuos orgánicos mediante la labranza anual en sistemas de secano, puede compensar el impacto negativo de la disrupción estructural de la labranza sobre el carbono orgánico del suelo. Esta reducción del  $C_{oxp}$  por parte del tratamiento de solo labranza con el palín mecánico podría estar asociado principalmente al mecanismo de acción del implemento, que promueve la desintegración de la macroestructura superficial del suelo, que expone el C físicamente ocluido y fomenta la oxigenación del perfil, estimulando el proceso de mineralización del carbono orgánico (Olchin et al., 2008), sobre todo las fracciones más lábiles ( $C_{oxp}$ ). Debido al mecanismo de acción distinto del Subsolador y el Descompactador, estos no presentaron reducción significativa del  $C_{oxp}$ . Lo que concuerda con estudios realizados por Santana, Masaguer, & Baldoquin, (2014), en el que se evaluó el efecto de sistemas de labranza en suelos

dedicados a la producción de pasto, en el que concluyeron que los sistemas de labranza que alteran la estructura superficial del suelo tienen efecto directo en la reducción del contenido de carbono orgánico, sobre todo en las fracciones más lábiles. Otro estudio indica que los sistemas de labranza que limiten las alteraciones estructurales de las capas superficiales del suelo (Subsolador y Descompactador), contribuyen a la conservación y almacenamiento del carbono orgánico del suelo (González Molina et al., 2018).

El incremento en  $C_{oxp}$  experimentado a 173 DDAT y la reducción de las diferencias entre tratamientos a los 263 DDAT en comparación con los valores registrados a los 78 DDAT por todos los tratamientos (excepto el Subsolador+Enmienda), podría estar relacionado principalmente al paso del tiempo y la acumulación de tejido vegetal suministrado por el sistema de producción de pastos (Capítulo 3). Estos cambios de concentración del carbono orgánico del suelo se explican por el incremento de la biomasa de las raíces en suelos bajo pastos perennes (Haynes et al., 1991). De acuerdo con Bojórquez Serrano et al. (2015) en un estudio sobre los cambios en las reservas de carbono del suelo bajo diferentes coberturas, determinaron que los suelos con cobertura de pastizal registran las mayores tasas de incremento en las reservas de carbono orgánico, por lo que las variaciones por efectos de los sistemas de labranza alcanzan un nuevo equilibrio luego de un cierto periodo de tiempo (Hermle et al., 2008).

Se demostró que los cambios a corto plazo en el  $C_{tot}$  del suelo son muy difíciles de evidenciar dado a la amplia gama de fracciones tanto lábiles como recalcitrantes que abarca el  $C_{tot}$ . Los resultados de cero diferencias entre los tratamientos de labranza y enmiendas durante todo el experimento (Figuras 2), podrían estar asociados principalmente al corto periodo de tiempo en el que se evaluó el efecto de los tratamientos. Dado que el  $C_{tot}$  constituye un amplio cajón de fracciones de carbono orgánico en el que solamente una pequeña porción es fácilmente mineralizable (5-20%), 78 y 173 días podría ser muy poco tiempo para poder observar cambios en los valores de carbono total. Según Cambardella & Elliott, (1992) el  $C_{tot}$  no es homogéneo en términos estructurales, más bien se compone de diversas sustancias que varían en sus características químicas y físicas, y que a su vez presentan distintas tasas de descomposición que cuyo cambio no es fácilmente observado en el corto periodo de tiempo (Hurisso et al., 2016).

Lo anterior nos permite inferir que: cambios relativamente pequeños en el Carbono orgánico del suelo como resultado de cambios en las prácticas de manejo, son generalmente difíciles de evaluar, pero pueden tener efectos pronunciados en el comportamiento del sistema edáfico y los procesos microbiológicos. El contrastar los cambios en el manejo del suelo y las alteraciones en el carbono orgánico puede llevar varios años para encontrar cambios cuantificables (Weil et al., 2003). Por lo general esto podría deberse al alto porcentaje de formas de C recalcitrante o humificado (Sikora et al., 1996). Las alteraciones en fracciones pequeñas, pero potencialmente oxidables (lábil) de C orgánico del suelo con la metodología  $C_{oxp}$ , podrían funcionar como indicadores tempranos del deterioro de las propiedades del suelo, o la mejora de estas, con el cambio en sus prácticas de manejo (Weil et al., 2003).

#### **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la actividad microbiana**

El efecto positivo de acuerdo al tamaño del efecto (4A) en la tasa de respiración para los tratamientos con enmienda a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos en comparación con los tratamientos sin enmienda, está asociado a la adición directa de C orgánico al suelo, por la incorporación de una enmienda compostada que además contribuye al crecimiento de la biomasa radicular y posiblemente exudados radicales del pasto, lo que también representa un incremento del contenido de C orgánico del suelo. No así, con los tratamientos de solo labranza, donde, por el contrario, la tasa de respiración se vio afectada negativamente, excepto por el tratamiento subsolador a los 78 días. Resultados similares encontraron Álvarez-Solís & Anzueto-Martínez, (2004) en un estudio donde evaluaron las propiedades microbiológicas del suelo bajo diferentes sistemas de manejo y años de uso de la tierra, donde la tasa de respiración se vio reducida en los suelos con más años de uso, debido principalmente al abatimiento de las reservas de C orgánico por el uso continuo de labranza mecanizada. Por su parte, Salvo et al. (2010), evaluó diferentes sistemas de labranza en sistemas de cultivo continuo, determinando que la labranza vertical no alteró de manera significativa las reservas de C orgánico del suelo a diferencia de los sistemas de labranza que implican la destrucción estructural edáfica. De igual manera los implementos de conservación en combinación con sistemas de fertilización orgánica contribuyen notablemente al mejoramiento de las propiedades

biológicas del suelo (Mijangos et al., 2006), por lo que la tasa de respiración incrementará y presentará cambios en dependencia de la calidad y cantidad de material orgánico adicionado al suelo (Arrigo et al., 2002)

La biomasa microbiana a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos fue influenciada positivamente por todos los tratamientos en comparación con el Control, sobre todo, para los tratamientos sin enmienda. Esto podría deberse al efecto positivo en las propiedades del suelo como la porosidad, que al favorecer el crecimiento radicular del cultivo (Six et al., 2004) y propicia un mayor suministro de carbono orgánico al suelo y por ende incrementar la biomasa microbiana (Silva et al., 2014). Esto concuerda con lo descrito por Alvear Z. et al. (2006), que al evaluar los efectos de sistemas de labranza de conservación determinó que esta favorece propiedades del suelo asociadas directamente con el crecimiento de raíces y favorece una mayor población de bacterias, que actúan rápidamente sobre los sustratos orgánicos y aceleran los procesos de oxidación biológica. La dilución de los efectos positivos de la labranza sobre la densidad aparente a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos podría explicar los resultados obtenidos a través del análisis de varianza, que refleja cero diferencias en la biomasa microbiana entre tratamientos.

## CONCLUSIONES

El carbono activo resulta ser una variable sensible al manejo, que permite observar cambios tempranos en el carbono orgánico del suelo, a diferencia del carbono total, que no mostró diferencias entre tratamientos en ninguna de las fechas de muestreo.

Los efectos de los tratamientos sobre el carbono activo varían con el paso del tiempo. El Palín Mecánico combinado con el uso de enmiendas presenta valores significativamente mayores a los tratamientos de solo labranza a los 78 DDAT, a diferencia del Palín Mecánico con una reducción significativa de esta variable. Luego de 173 DDAT el Descompactador + Enmienda y Descompactador mostraron valores significativamente mayores al Control y a los 263 días el Palín Mecánico + Enmienda.

El Subsolador + Enmienda y Descompactador + Enmienda mostraron incrementos (Tamaño del efecto) tanto a los 78 como a los 173 DDAT en la tasa de respiración. En cambio, la labranza mecanizada con los implementos utilizados sin la aplicación de enmiendas, presentaron de manera general un incremento de la biomasa microbiana en los primeros 78 días después de la aplicación de los tratamientos, sin embargo, los efectos de la labranza sobre este parámetro no fueron permanentes y con el transcurso del tiempo desaparecieron a los 173 DDAT.

## LITERATURA

- Álvarez-Solís, J. D., & Anzueto-Martínez, M. de J. (2004). Soil microbial activity under different corn cropping systems in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Agrociencia*. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Soil+microbial+activity+under+different+corn+cropping+systems+in+the+Highlands+of+Chiapas%2C+Mexico&author=Alvarez-Solis%2C+J.D.&publication\\_year=2004](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Soil+microbial+activity+under+different+corn+cropping+systems+in+the+Highlands+of+Chiapas%2C+Mexico&author=Alvarez-Solis%2C+J.D.&publication_year=2004)
- Alvear Z, M., Pino B, M., Castillo R, C., Trasar - Cepeda, C., & Gil - Sotres, F. (2006). Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un alfisol del sur de Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(2), 38-53.
- Aquije Ramos, CA. 2019. Optimización de la agricultura sostenible mediante el uso del biocarbón en el Perú. *Universidad Científica del Sur*.
- Araya, M. & Boschini, C. 2005. Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la meseta central de Costa Rica. *Agronomía mesoamericana* 16(1): 37-43.
- Arrigo, N. M., Jiménez, M. de la P., Efron, D., & Defrieri, R. (2002). Carbono de respiración de un suelo forestal y su relación con la calidad de la hojarasca. *Agricultura Técnica*, 62(2), 331-338.
- Bojórquez Serrano, J. I., Castillo Pacheco, L. A., Hernández Jiménez, A., García Paredes, J. D., & Madueño Molina, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 63-69.
- Brewer, K. M., & Gaudin, A. C. M. (2020). Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 107936.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-2.
- Brookes, P. C., Cayuela, M. L., Contin, M., De Nobili, M., Kemmitt, S. J., & Mondini, C. (2008). The mineralisation of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. *Waste Management*, 28(4), 716-722.



- Camacho, M., Mata, R. & Forsythe, W. (2015). Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 101-115.
- Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 777-783.
- Cardona, W. A., Bolaños Benavides, M. M., & Chavarriaga montoya, W. (2015). Efecto de fertilizantes químicos y orgánicos sobre la agregación de un suelo cultivado con *Musa acuminata* AA. *Acta Agronómica*, 65(2), 144-148.
- Comese, R. V., González, M. G., & Conti, M. E. (2009). Cambios en las propiedades de suelo de huerta y rendimiento de *Beta Vulgaris* var. Cicla (I) por el uso de enmiendas orgánicas. *Ciencia del suelo*, 27(2), 271-275.
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., ... Wander, M. M. (2012). Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494-504.
- Durang, W., Uribe, L., Henríquez, C., & Mata, R. (2015). Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 39(1), 37-46.
- Flores Delgadillo, L. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de Suelos, México: *Universidad nacional autónoma de México*.
- Fornara, D. A., & Tilman, D. (2008). Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *Journal of Ecology*, 96(2), 314-322.
- Forsythe, W. (1985). Física de suelos: manual de laboratorio 1º edn. IICA, *San José de Costa Rica*.
- Gamarra Lezcano, CC; Díaz Lezcano, MI; Vera de Ortiz, M; Galeano, M del P; Cabrera Cardús, AJN. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales* 9(46), 4-26.

- González Molina, L., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Báez Pérez, A., & González Camacho, J. M. (2018). Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1275-1285.
- Haynes, R. J., Swift, R. S., & Stephen, R. C. (1991). Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research*, 19(1), 77-87.
- Hermle, S., Anken, T., Leifeld, J., & Weiskopf, P. (2008). The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research*, 98(1), 94-105.
- Hurisso, T. T., Culman, S. W., Horwath, W. R., Wade, J., Cass, D., Beniston, J. W., ... Ugarte, C. M. (2016). Comparison of Permanganate-Oxidizable Carbon and Mineralizable Carbon for Assessment of Organic Matter Stabilization and Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1352-1364.
- Martínez H, E., Fuentes E, J. P., & Acevedo H, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Mijangos, I., Pérez, R., Albizu, I., & Garbisu, C. (2006). Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(1), 100-106.
- Olchin, G. P., Ogle, S., Frey, S. D., Filley, T. R., Paustian, K., & Six, J. (2008). Residue Carbon Stabilization in Soil Aggregates of No-Till and Tillage Management of Dryland Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 507-513.
- Olmo Prieto, M. (2016). Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Recuperado de <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13381>
- Paolini Gomez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(1), 13.
- Piedra Quesada, V. (2017). División territorial administrativa de la República de Costa. San José: Imprenta Nacional.

- Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Pacheco, E. V., & Barra, J. D. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Revista Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- Rivera, J. A. C., Guerrero, J. N. Q., & Batista, R. M. G. (2019). Evaluación de la mineralización de biochar sobre parámetros químicos del suelo en dos tiempos de incubación. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(3), 6-11.
- Salvo, L., Hernández, J., & Ernst, O. (2010). Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 116-122.
- Santana, L., Masaguer, A., & Baldoquin, A. (2014). Efecto de sistemas de labranza en luvisoles dedicados a la producción de pastos. *Pastos y forrajes*, 37(4), 408-412.
- Sikora, L. J., Yakovchenko, V., Cambardella, C. A., & Doran, J. W. (1996). Assessing soil quality by testing organic matter. *Soil organic matter: Analysis and interpretation*, 46, 41-50.
- Silva, A. P. da, Babujia, L. C., Franchini, J. C., Ralisch, R., Hungria, M., & Guimarães, M. de F. (2014). Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. *Soil and Tillage Research*, 142, 42-53.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31.
- Solano, J. & Villalobos, R. (2012). *Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de [www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr).
- Vallejos, A., Kees, M., Bondia, P., Echeverría, N., Silenzi, J., Zajac, C., & De Lucia, M. (2014). Subsulado En Siembra Directa: Efectos Sobre Parámetros Físicos Del Suelo y El Rendimiento De Soja. *Ciencia del suelo*, 32(2), 291-300.
- Vance, E., Brookes, P., & Jenkinson, D. (1987). An Extraction Method for Measuring Soil Microbial Biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.

- Waters, C. M., Orgill, S. E., Melville, G. J., Toole, I. D., & Smith, W. J. (2017). Management of Grazing Intensity in the Semi-Arid Rangelands of Southern Australia: Effects on Soil and Biodiversity. *Land Degradation & Development*, 28(4), 1363-1375.
- Weil, R. R., Islam, K. R., Stine, M. A., Gruver, J. B., & Samson-Liebig, S. E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3-17.
- WingChing-Jones, R., & Uribe, L. (2016). Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8, 107-116.
- Xu, D., & Mermoud, A. (2001). Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. *Soil and Tillage Research*, 60(1), 11-19.
- Zhou, G., Zhou, X., He, Y., Shao, J., Zhenhong, H., Liu, R., Huimin, Z., & Hosseini Bai, S. (2016). Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 23.

**Capítulo 3. Efecto de tres implementos de labranza mecanizada y uso de enmiendas sobre la calidad física y química del suelo cultivado con pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.**

**RESUMEN**

El suelo juega un papel preponderante en la calidad ambiental y el desarrollo de sistemas productivos, cuyas propiedades definen su capacidad para llevar a cabo funciones específicas dentro del agroecosistema y que al final se traducen en el rendimiento de los cultivos. Dentro de las propiedades consideradas como indicadores de la calidad edáfica se encuentran las propiedades físicas y químicas. En este experimento evaluamos el efecto de la labranza y enmiendas orgánica y calcárea sobre las propiedades físicas y químicas del suelo bajo producción de pasto transvala de corte (*Digitaria decumbens* Stent.). Las variables fueron analizadas a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos y una evaluación adicional para variables físicas a los 263 días. Los tratamientos consistieron en Subsolador, Palín Mecánico, Descompactador, Subsolador+Enmienda, Palín Mecánico+Enmienda, Descompactador+Enmienda y un tratamiento Control. Los resultados a los 78 días muestran que el Descompactador+Enmienda presentó los valores más bajos ( $0,37 \pm 0,08$  cmol(+)/L) de acidez, siendo significativamente distintos al Palín Mecánico, y al Control a los 173 DDAT con ( $0,31 \pm 0,10$ ), manteniendo valores relativamente similares en los demás tratamientos. El pH más alto a los 78 días se observó en Descompactador+Enmienda ( $5,28 \pm 0,08$ ) donde ningún tratamiento superó el nivel crítico (5,5); sin embargo, a los 173 días, el Descompactador+Enmienda ( $5,60 \pm 0,11$ ) y Palín Mecánico+Enmienda ( $5,55 \pm 0,03$ ) mostraron los mejores resultados. La saturación de acidez no mostró diferencias significativas en los tratamientos de solo labranza a los 78 días en relación al control, sin embargo; no así a los 173 días, donde los tratamientos Descompactador+Enmienda ( $2,93 \pm 1,15\%$ ) y Palín Mecánico+Enmienda ( $3,03 \pm 0,99\%$ ) que, además de ser los que presentaron menor saturación de acidez, fueron estadísticamente distintos ( $p < 0,05$ ) al Control ( $13,00 \pm 2,04\%$ ). El Descompactador+Enmienda presentó los valores de Ca más altos ( $7,40 \pm 0,34$  cmol(+)/L) a los 78 y 173 días. Los valores de magnesio permanecieron relativamente constantes durante todo el experimento sin presentar diferencias entre tratamientos. Para el caso del potasio el tratamiento Palín

Mecánico+Enmienda presentó el mejor resultado a los 78 y 173 días con  $0,15\pm 0,02$  y  $0,13\pm 0,01$  cmol(+)/L respectivamente. Para el caso de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), a los 78 y 173 días, el Descompactador+Enmienda presentó los valores más altos ( $10,35\pm 0,24$  y  $11,44\pm 0,97$  cmol(+)/L respectivamente). Ningún tratamiento presentó diferencia significativa en el contenido de nitrógeno y micronutrientes comparados con el control durante todo el experimento, al igual que el cobre a los 78 días, sin embargo, sí fue estadísticamente distinto al control a los 173 días. El Subsolador+Enmienda obtuvo la menor densidad aparente y porosidad a los 78 días ( $1,0$  g/cm<sup>3</sup> y 58,26% respectivamente) siendo significativamente distinto al Control; además, a los 173 y 263 días no se apreciaron diferencias de los tratamientos con el Control. Se observó un efecto positivo de todos los tratamientos sobre la resistencia a la penetración a los 78 y 173 días. El subsolador mostró los valores más altos de infiltración instantánea e infiltración básica a los 78 y 263 días ( $0,64$  cm/min y  $0,67$  cm/min respectivamente), a los 173 días los mejores resultados fueron obtenidos por el Palín Mecánico+Enmienda en ambos parámetros ( $0,27$  cm/min de infiltración básica). El Palín Mecánico presentó el mejor valor de agua disponible y fácilmente disponible (9,50 y 6,89% respectivamente). Los tratamientos de labranza por sí solos, no presentaron un efecto importante sobre las propiedades químicas del suelo, no así, para los tratamientos de labranza + enmienda, por lo que la adición de una enmienda calcárea y orgánica en estas condiciones tuvo un efecto positivo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Por su parte, la mayoría de las propiedades físicas se vieron beneficiadas por los tratamientos de labranza, los cuales mostraron resultados aún más favorables cuando son aplicados en conjunto con una enmienda.

## INTRODUCCIÓN

El suelo, es uno de los tres pilares fundamentales de la calidad ambiental, en los que también figura el agua y el aire (Andrews et al., 2002). La definición de calidad de suelo no está únicamente relacionada con el grado de contaminación y su impacto sobre la salud humana y animal (Gregorich et al., 1997), sino que se define como “*su capacidad de funcionar dentro de los límites del ecosistema y el uso de la tierra para sustentar la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la producción de plantas y salud animal*” (Doran & Parkin, 1994).

Par evaluar la calidad del suelo, es necesario llevar a cabo el análisis de distintas propiedades de este, consideradas como indicadores de dicha calidad. Se trata de la medición de cualidades edáficas que tienen influencia directa sobre la capacidad del suelo para llevar a cabo una función específica (Karlen et al., 1997). Entre las propiedades que podemos evaluar para determinar la calidad de un suelo se encuentran las propiedades químicas y físicas (Doran & Parkin, 1994). Las que pueden ser de utilidad para evaluar y dar seguimiento a los efectos de las prácticas de manejo del suelo, cuya información puede contribuir en el diseño de sistemas de producción sostenible, identificando y minimizando los efectos perjudiciales de las prácticas de manejo que conllevan a su degradación (Jamioy et al., 2015; Estrada-Herrera et al., 2017).

La ganadería es una de las más extensas e importantes actividades económicas a nivel mundial, para el 2021 la crianza de ganado vacuno en Costa Rica generó una producción bruta de 523 134,3 millones colones y 537 905,2 millones en 2022 (Ramírez et al., 2022). Es un importante proveedor de nutrientes, satisfaciendo alrededor del 17% de las calorías y el 33% de proteína en la alimentación humana (Rosegrant et al., 2009). Sin embargo, en su mayoría, los suelos dedicados a esta actividad enfrentan un deterioro progresivo de sus propiedades, lo que representa una problemática creciente que afecta la nutrición del ganado, incidiendo directamente en la sustentabilidad de los sistemas pecuarios (Montanari et al., 2013). Se estima que, en Centro América, más del 35 % de las pasturas muestran una degradación avanzada (Szott et al., 2000) y que prácticas inadecuadas de ganadería extensiva han promovido el deterioro de recurso edáfico en el pacífico central de Costa Rica (Sepúlveda et al., 2009). Además, la presión existente del mercado y la industria, que

demanda la producción de productos lácteos y cárnicos, resulta en la sobre explotación del recurso suelo, que conlleva a su degradación (Camacho et al., 2015).

Por su parte, los sistemas de labranza de conservación o labranza reducida ofrecen una alternativa para el mejoramiento y la recuperación de las propiedades físicas y químicas del suelo, contrarrestando los procesos de degradación de este (Wang et al., 2014; Büchi et al., 2017; Liu et al., 2021), cuyos efectos positivos tienen un mayor alcance cuando estos sistemas de labranza se combinan con la incorporación de enmiendas calcáreas (Stenberg et al., 2000). Dado a su eficiencia y reducido valor económico en comparación a otras enmiendas, el carbonato de calcio es la enmienda mayormente aplicada en países tropicales como medida de manejo de la acidez del suelo y mejorador de las propiedades físicas (Camacho et al., 2015). Además, la incorporación de fertilizantes orgánicos en combinación con estos sistemas de labranza, también permiten una mejora sustancial en la calidad del suelo para la producción de pasto, no solamente en las propiedades físicas y químicas del suelo, sino incluso las propiedades biológicas (Willekens et al., 2014).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre las propiedades físicas y químicas del suelo cultivado con pasto *Transvala* (*Digitaria decumbens* Stent.), con el fin de ofrecer recomendaciones de manejo sostenible del suelo en los sistemas ganaderos del Pacífico Central de Costa Rica.



## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una finca dedicada a la producción ganadera, ubicada en Labrador de San Mateo de Alajuela (9°56'01"N 84°37'59"O), perteneciente a la región del Pacífico Central de Costa Rica, en la cuenca del Río Jesús María, con una altitud de 254 msnm (Piedra Quesada, 2017). El sitio se caracteriza por un régimen de humedad Ústico, con un periodo seco con duración aproximada de 4 a 5 meses y otro lluvioso que dura aproximadamente 8 meses, con una precipitación media anual de 2637 mm. La temperatura media anual es de 26°C (Solano & Villalobos, 2012). El suelo en el sitio de estudio es un Ustic Palehumults, según su clasificación taxonómica del sistema USDA, los cuales son antiguos, meteorizados, con contenidos de arcilla altos, ricos en materia orgánica y de régimen de humedad Ústico, que se caracteriza por una época seca marcada mayor a 3 meses (Camacho, 2015).

### Diseño del Experimento

El experimento se estableció en un área de 2405 m<sup>2</sup>, donde se ubicaron 28 sub-parcelas o unidades experimentales con dimensiones de 3 x 10 m (30 m<sup>2</sup>). Con un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos por bloque más un control, repetido en 4 bloques. Los tratamientos consistieron en labranza mecanizada de suelo utilizando tres implementos: Palín Mecánico, Descompactador y Subsolador, más un Control. Además, se utilizó una enmienda de tipo orgánico o compostado a base de gallinaza (Cuadro 1), en combinación con CaCO<sub>3</sub> (Cuadro 2). En total se aplicaron seis tratamientos más un control sin labranza y sin enmiendas (Cuadro 3).

**Cuadro 1.** Características físicas y químicas del compost.

% masa								
C	MO	Humedad	N	P	Ca	Mg	K	S
16,40	23,45	26	2,53	2,17	3,66	0,69	2,48	0,52
mg/kg						Relación	H <sub>2</sub> O	mS/cm
Fe	Cu	Zn	Mn	B	C/N	pH	CE	
36391	144	568	1388	37	6,5	7,8	20,8	

**Cuadro 2.** Características químicas y granulométricas de la cal.

PUREZA QUÍMICA						% PRNT	
% Humedad	% masa/masa						% EQ
	Ca	Mg	S	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>		
0,2%	39,3	0,1		98,3	0,4	98,8	
GRANULOMETRÍA						98,7	
# de malla	10	20	40	60	> 60		% EG
% de material	0,0	0,0	0,0	0,2	99,8		
% de efectividad	0,0	0,0	0,0	0,1	99,8		99,9

EQ: Equivalente químico; EG: Efectividad granulométrica; PRNT; Poder relativo de neutralización total

**Cuadro 3.** Tratamientos de labranza mecanizada y enmiendas.

Tratamientos	Profundidad de trabajo (cm)	Separación entre órganos de labor (cm)	Compost (ton/ha)	CaCO <sub>3</sub> (ton/ha)
Subsolador	40	65		
Palín Mecánico	15	25		
Descompactador	20	39		
Subsolador+Enmienda	40	65	7,33	2
Palín Mecánico+Enmienda	15	25	7,33	2
Descompactador+Enmienda	20	39	7,33	2
Control				

### Muestreo de suelos

Los periodos de muestreo se ajustaron a las fechas de corte del pasto establecidas por el productor, a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos para los análisis químicos y una campaña de muestreo adicional a los 263 días para algunos parámetros físicos. Se tomaron 4 muestras al azar por cada uno de los tratamientos a una profundidad de 10 cm, dependiendo del parámetro, estas muestras fueron colocadas en bolsas plásticas, cilindros o anillos, para posteriormente ser llevadas al laboratorio para su debido análisis.

## **Variables evaluadas**

*Carbono y Nitrógeno total (C<sub>tot</sub>):* Fueron determinados con un autoanalizador de C-N (Marca Elemental, modelo Vario MacroCube), mediante la técnica de combustión seca. Este análisis se realizó en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA-UCR).

*Relación C/N:* Como índice de calidad del componente orgánico del suelo, la relación C/N, cuantifica la tasa de nitrógeno que se encuentra disponible para la nutrición de las plantas. Altos valores indican, que la materia orgánica se mineraliza de forma lenta, tomando en cuenta que la microbiota del suelo lleva a cabo un proceso de inmovilización del nitrógeno, por lo que dicho material no será muy útil en la nutrición vegetal dado a su baja disponibilidad de nitrógeno. Por otro lado, valores relativamente bajos (10 -14) implican una rápida descomposición del componente orgánico, puesto que los microorganismos se ven estimulados, en otras palabras, relaciones bajas de C/N implican una mayor eficiencia por parte de los microorganismos al degradar la materia orgánica (Gamarrá Lezcano et al., 2018).

*Variables químicas del suelo:* El pH de las muestras de suelo se midió en agua (en una razón suelo:agua de 1:2,5) y se determinó por métodos potenciométricos. También, se evaluó P disponible, los cationes disponibles (Ca, Mg, K y acidez) y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE = Al + H + Ca + Mg + K). El Ca, Mg y la acidez intercambiable se midió con extracción en KCl 1M, en razón 1:10. La saturación de acidez es el porcentaje del complejo de intercambio (CICE) ocupado por cationes ácidos (H<sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup>). Los elementos disponibles P, K, Fe, Cu, Zn y Mn fueron extraídos y medidos en solución Olsen modificada pH 8,5 (NaHCO<sub>3</sub> 0,5 N, EDTA 0.01 M, Superfloc 127). Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliare del CIA-UCR.

## **Variables físicas e hidrológicas del suelo**

*Densidad aparente ( $\rho_a$ ):* Se tomaron en total cuatro muestras por tratamiento a una profundidad de 10 cm, siguiendo el método del cilindro con volumen conocido establecido por Forsythe (1985). Con el uso de este cilindro se consiguen muestras sin disturbar, las cuales se colocan en un horno a una temperatura de 105 °C por un periodo de 48 horas,

luego de esto se pesa el cilindro con suelo seco, restando el peso del cilindro vacío. La densidad aparente es la masa de suelo seco por unidad de volumen total confinado del cilindro (unidades en  $\text{g cm}^3$ ).

*Densidad de partículas sólidas ( $\rho_p$ ):* Se determinó usando el método del picnómetro modificado descrito por Flores Delgadillo (2010). Se tomaron cuatro muestras por tratamiento a una profundidad de 10 cm. Este método consiste en pesar el picnómetro vacío utilizando una balanza de precisión, se agregan suelo seco. Se llena el picnómetro a media capacidad con agua destilada. A fin de remover el aire retenido en el suelo, se introducirá el picnómetro en un desecador de vacío por varios minutos. Durante este tiempo, se debe agitar ocasionalmente y con cuidado el picnómetro para evitar pérdida de suelo y dejando reposar el picnómetro dentro del desecador por 30 minutos. Posteriormente, se llena el picnómetro con agua destilada, se inserta la tapa, se pesa y se determinará la temperatura de este. Se desecha el contenido del picnómetro y se lava el interior con agua destilada, luego se llena el picnómetro con agua destilada hervida y enfriada. Por último, se pesa el picnómetro con agua y se determina la temperatura. Para conocer la densidad de partículas de la muestra ( $\rho_p$  en  $\text{g/cm}^3$ ), finalmente se aplica la siguiente ecuación:

$$\rho_p(\text{g/cm}^3) = \rho_w (W_s - W_a) / [(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)]$$

Donde:

$\rho_w$ : Densidad del agua ( $\text{g/cm}^3$ ) a la temperatura observada.

$W_s$ : Peso del picnómetro con la muestra (g).

$W_a$ : Peso del picnómetro con aire (g).

$W_{sw}$ : Peso del picnómetro llenado con suelo y agua (g).

$W_w$ : Peso del picnómetro llenado con agua a la temperatura observada (g).

*Porosidad total (f):* Es la fracción volumétrica del suelo ocupada por aire y/o agua (poros). Esta variable se determinó por medio de la relación física entre el volumen total, la densidad aparente y densidad de partículas (Forsythe, 1985). Esta variable se obtiene con la siguiente fórmula:

$$f = 1 - \left( \frac{\rho_a}{\rho_p} \right)$$

Donde:

$f$  = Porosidad (%)

$\rho_a$  = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_p$  = Densidad de partículas (g/cm<sup>3</sup>)

*Resistencia a la penetración:* Se utilizó un penetrológico digital marca Eijkelkamp, como medida directa de la compactación del suelo. Se trabajó con la punta cónica #2, la cual tiene un área de 2 cm<sup>2</sup> en la base y un ángulo apical de 60°. Se realizaron 12 mediciones por tratamiento hasta una profundidad de 50 cm. El instrumento mide la presión ejercida en MPa.

*Contenido de humedad:* La humedad del suelo se determinará a través de los métodos gravimétrico y volumétrico, utilizando la metodología descrita por Forsythe (1985). La *humedad gravimétrica ( $\theta_g$ ):* se determinó tomando cuatro muestras por tratamiento de forma aleatoria, cada una consistió en 100 g de suelo tomados a una profundidad de 10 cm, las cuales serán pesadas y luego colocadas en un horno a 105 °C por un periodo de 48 horas. Luego de este tiempo, las muestras serán pesadas nuevamente y se aplicará la siguiente fórmula:

$$\theta_g(\%) = \left( \frac{M_{suelo\ húmedo} - M_{suelo\ seco}}{M_{suelo\ seco}} \right) \times 100$$

*Humedad volumétrica ( $\theta_v$ ):* Se determinó la fracción volumétrica de agua del suelo, estableciendo la relación entre la densidad aparente ( $\rho_a$ ) y la humedad gravimétrica ( $\theta_g$ ) del suelo, a través de la siguiente ecuación:

$$\theta_v = \frac{\rho_a}{\rho_w} \times \theta_g$$

*Agua disponible y agua fácilmente disponible:* La capacidad de retención de agua de un suelo es fundamental para asegurar un desarrollo adecuado del sistema radical del pasto.

Este parámetro se determinó a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, usando las ollas de presión (Soil Moisture Inc., California), se midió la humedad volumétrica a varios puntos de potencial matricial (Forsythe., 1985): 0, 100, 330 hPa (capacidad de campo), 1000, 5000, 10000 y 15000 hPa (punto de marchitez permanente). El agua disponible se define tradicionalmente como la diferencia entre el agua retenida a potencial matricial de capacidad de campo y punto de marchitez. El agua fácilmente disponible es la diferencia entre el agua retenida a 330 hPa y 5000 hPa de potencial matricial. Finalmente se ajustó el modelo de van Genuchten (van Genuchten et al., 1991) el cual es una ecuación no lineal que describe el comportamiento de la curva de retención de humedad que ayuda a estimar el contenido de humedad según la tensión o potencial matricial (y viceversa). Los parámetros de ajuste del modelo se obtuvieron con el software RETC (van Genuchten et al., 1991).

$$\theta v(h) = \frac{\theta_S - \theta_R}{[1 + (-\alpha h)^n]^m} + \theta_R$$

Donde,

$\theta v$  = humedad volumétrica (fraccional).

$h$  = tensión o potencial matricial (cm H<sub>2</sub>O).

$\theta_S$  = humedad a saturación. \*

$\theta_R$  = humedad residual cuando el suelo está seco. \*

$\alpha$  = parámetro de ajuste del modelo vG. \*

$n$  = parámetro de ajuste del modelo. \*

$m = 1 - (1/n)$

*Distribución de tamaño de poros:* La distribución de tamaño de poros del suelo y su geometría resultan aún más importantes de conocer que la porosidad total del mismo, ya que permite predecir el comportamiento de las propiedades hidráulicas del mismo (Vogel & Roth, 2001). De acuerdo con Dexter & Bird, (2001), el contenido de humedad del suelo en función de los requerimientos hídricos de los cultivos se subdivide en tres partes: límite superior (suelo saturado), contenido de agua disponible y límite inferior (suelo seco), cuyos puntos en la curva de retención de humedad (según el modelo de van Genuchten) pueden verse modificados por los sistemas de labranza. Así, es posible distinguir la distribución de tamaño de poros en 4 tipos de poros según su función y tamaño, clasificados como poros de drenaje rápido ( $h > -100$  hPa y tamaño de poro  $> 30 \mu m$ ), poros de drenaje lento ( $h -100$  y

-330 hPa y tamaño de poros de 10-30  $\mu\text{m}$ ), poros de agua disponible (h -330 y -15000 hPa y tamaño de poros de 10-0,2  $\mu\text{m}$ ) y poros de agua no disponible (h < -15000 hPa y tamaño de poros < 0,2) (Martínez et al., 2008).

*Infiltración:* Este parámetro se determinó con el método del infiltrómetro o cilindro de doble anillo, en un punto elegido al azar por sub-parcela, siguiendo el siguiente procedimiento: Usando un martillo de goma y un bloque de madera, se inserta el infiltrómetro a una profundidad de 10 cm, este deberá ser insertado de manera vertical y con una postura nivelada. Con el infiltrómetro colocado en su sitio, se afirma el suelo con los dedos solamente alrededor de los bordes internos de los anillos (interior y exterior) para prevenir filtraciones adicionales, evitando disturbar el resto de la superficie del suelo dentro del anillo. Posteriormente, se cubre con una lámina de plástico el anillo interno y la superficie del suelo dentro del anillo, con lo que se evitará que el agua se infiltre antes de iniciar el tiempo de la prueba de infiltración. Se vierte el agua en el anillo interior previamente recubierto con una envoltura plástica, se rellenará el anillo exterior con agua hasta que la lámina de este alcance el mismo nivel que la lámina de agua del cilindro interior (deberá hacerse inmediatamente antes de retirar la envoltura plástica del cilindro interior) y se mantendrá el mismo nivel de agua tanto del anillo interior como el exterior rellenando únicamente el anillo exterior con agua a medida transcurra el tiempo. Luego, se coloca la bolla graduada y se sacará la cobertura plástica tirando con cuidado hacia afuera, dejando el agua dentro del cilindro interno. Se debe registrar el agua infiltrada cada 2 minutos. lo cual deberá repetirse hasta que el agua infiltrada no varíe en el tiempo. Finalmente, se plasmará los datos registrados en el cuadro de infiltración acumulada, con los cuales se podrá elaborar la curva de infiltración. Finalmente se determinó la conductividad hidráulica de campo o infiltración básica, por medio del modelo de Kostiakov (Kostiakov, 1911, citado por Hillel, 1998).

## **Análisis de datos**

Los datos se analizaron con el software estadístico R (RStudio) versión 1.3.1073 (© 2009-2020 RStudio, PBC). Se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuales, homogeneidad de la varianza y presencia de observaciones influyentes (valores extremos). De cumplir con los supuestos, posteriormente se realizó un análisis de varianza de dos vías (ANDEVA) con la función `aov()`, para determinar si existía interacción entre tratamientos y fechas de muestreo. Y con la función `ggbetweenstats()` del paquete “`ggstatsplot`”, para el caso de la resistencia a la penetración. En caso de encontrar diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey) con la función `tukeyHSD()`, por tratamientos entre fechas de muestreo y entre tratamientos por fechas de siembra. En caso de que no se cumplieran los supuestos del análisis de varianza, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas y una comparación por pares con `DUNN`.



## RESULTADOS

### **Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades químicas del suelo**

#### *Acidez del suelo*

La acidez del suelo fue influenciada positivamente por los tratamientos de labranza combinada con la aplicación de enmiendas. Los resultados a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos muestran una reducción sustancial en la acidez intercambiable del suelo para los tratamientos de labranza con enmienda, siendo el tratamiento Descompactador+Enmienda el que presentó los valores más bajos ( $0,37\pm 0,08$  cmol(+)/L) seguido del Palín Mecánico+Enmienda ( $0,46\pm 0,12$  cmol(+)/L) siendo significativamente distintos al Palín Mecánico y al Control a los 173 DDAT. La acidez mantuvo valores relativamente constantes para todos los tratamientos, a diferencia del Control, que presentó un incremento de  $0,10$  cmol(+)/L a los 173 días y el Palín Mecánico que redujo la acidez en  $0,23$  cmol(+)/L. En el caso del Palín mecánico a los 173, este continuó siendo el tratamiento con la acidez intercambiable más alta.

El comportamiento del pH ninguno de los tratamientos logro superar el valor crítico de 5,5 a los 78 días, donde se observaron diferencias significativas en los tratamientos relacionados al Control. El pH más alto se encontró en el Descompactador más Enmienda siendo significativamente mayor que el Palín Mecánico. El pH obtenido a los 173 días bajo los tratamientos de labranza con enmienda fue mayor en comparación con el Control y con sus homólogos sin enmienda. Sin embargo, los tratamientos de Descompactador+Enmienda ( $5,60\pm 0,11$ ) y Palín Mecánico+Enmienda ( $5,55\pm 0,03$ ) fueron los únicos que presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,005$ ) en comparación con el Control y con el tratamiento Palín Mecánico, el cual presento el valor más bajo de pH  $5,20\pm 0,04$ . Además, estos tratamientos con enmienda fueron los únicos que incrementaron los valores de pH por encima del valor crítico durante esta segunda etapa de evaluación.

La saturación de acidez mostró diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre los tratamientos de labranza con enmienda comparados con el tratamiento Palín Mecánico ( $17,60\pm 2,14$ ), presentando estos una reducción de los valores de este parámetro, comparados incluso con el Control ( $10,65\pm 1,21$ ). Sin embargo, no hubo diferencia estadística ( $p > 0,05$ ) con este

último durante los primeros 78 días de experimento. A los 173 días, los tratamientos Descompactador+Enmienda ( $2,93\pm 1,15$ ) y Palín Mecánico+Enmienda ( $3,03\pm 0,99$ ) presentaron menor saturación de acidez y fueron estadísticamente distintos ( $p < 0,05$ ) al Control ( $13,00\pm 2,04$ ), que obtuvo el valor más alto.

**Cuadro 6.** Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades ácidas del suelo analizadas en dos momentos. Letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo

<b>DDAT</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Acidez cmol(+)/L</b>	<b>pH Log10(H<sup>+</sup>)</b>	<b>SA (%)</b>
<b>78</b>	<b>Subsolador</b>	$0,89\pm 0,05^{ab}$	$5,13\pm 0,05^{ab}$	$11,35\pm 0,99^{ab}$
	<b>Palín Mecánico</b>	$1,22\pm 0,14^a$	$4,90\pm 0,04^b$	$17,60\pm 2,14^a$
	<b>Descompactador</b>	$0,80\pm 0,17^{ab}$	$5,13\pm 0,11^{ab}$	$9,75\pm 2,27^{ab}$
	<b>Subsolador más Enmienda</b>	$0,59\pm 0,16^b$	$5,18\pm 0,03^{ab}$	$6,83\pm 2,33^b$
	<b>Palín Mecánico más Enmienda</b>	$0,46\pm 0,12^b$	$5,18\pm 0,08^{ab}$	$4,95\pm 1,60^b$
	<b>Descompactador más Enmienda</b>	$0,37\pm 0,08^b$	$5,28\pm 0,08^a$	$3,63\pm 0,81^b$
	<b>Control</b>	$0,90\pm 0,07^{ab}$	$5,13\pm 0,08^{ab}$	$10,65\pm 1,21^{ab}$
<b>173</b>	<b>Subsolador</b>	$0,85\pm 0,10^{ab}$	$5,25\pm 0,03^{bc}$	$9,28\pm 1,54^{ab}$
	<b>Palín Mecánico</b>	$0,99\pm 0,11^a$	$5,20\pm 0,04^c$	$11,03\pm 1,72^{ab}$
	<b>Descompactador</b>	$0,81\pm 0,20^{ab}$	$5,38\pm 0,08^{abc}$	$8,93\pm 2,81^{ab}$
	<b>Subsolador más Enmienda</b>	$0,56\pm 0,17^{ab}$	$5,45\pm 0,06^{abc}$	$6,05\pm 2,17^{ab}$
	<b>Palín Mecánico más Enmienda</b>	$0,32\pm 0,07^b$	$5,55\pm 0,03^{ab}$	$3,03\pm 0,99^b$
	<b>Descompactador más Enmienda</b>	$0,31\pm 0,10^b$	$5,60\pm 0,11^a$	$2,93\pm 1,15^b$
	<b>Control</b>	$1,08\pm 0,15^a$	$5,23\pm 0,09^c$	$13,00\pm 2,04^a$

DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; cmol(+)/L: centimoles por litro; Log10(H<sup>+</sup>): logaritmo de base 10 de la concentración de iones de hidrogeno; SA: saturación de acidez; ±: error estándar

*Bases del suelo*

El contenido de calcio se vio afectado positivamente por los tratamientos de labranza con enmienda en los dos periodos de muestreo. A los 78 días después de la aplicación de los tratamientos estos presentaron valores superiores al Control ( $4,97 \pm 0,06$  cmol(+)/L), pero el único que fue estadísticamente diferente ( $p < 0,05$ ) fue el Descompactador+Enmienda ( $7,40 \pm 0,34$  cmol(+)/L), que a su vez fue el tratamiento con el mayor valor. De igual manera, los tratamientos con enmienda fueron superiores a los tratamientos de solo labranza, de los cuales el Palín Mecánico ( $3,99 \pm 0,27$  cmol(+)/L) obtuvo el menor valor de calcio y que fue estadísticamente distinto a todos los tratamientos con enmienda. A los 173 días los tratamientos con los mayores contenidos de calcio fueron el Descompactador+Enmienda y Palín Mecánico+Enmienda con  $8,34 \pm 0,81$  cmol(+)/L y  $8,19 \pm 0,83$  cmol(+)/L respectivamente, ambos estadísticamente distintos al Control ( $4,92 \pm 0,26$  cmol(+)/L) que obtuvo el menor valor de calcio. Por su parte, el contenido de magnesio no fue afectado por los tratamientos en ninguno de los periodos de muestreo, ya que los valores de este parámetro se mantuvieron relativamente constantes durante todo el estudio sin presentar diferencias significativas entre tratamientos.

El contenido de potasio determinado a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos fue mayor en los tratamientos de labranza con enmienda comparados con los tratamientos de solo labranza y el Control. Sin embargo, el único que presentó diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) con estos (excluyendo el Subsolador) fue el Palín Mecánico+Enmienda, con un valor de  $0,15 \pm 0,02$  cmol(+)/L y que a su vez, fue el tratamiento con mayor contenido de este elemento. Luego de 173 días, el tratamiento con mayor contenido de potasio continuó siendo el Palín Mecánico+Enmienda con  $0,13 \pm 0,01$  cmol(+)/L, el cual fue el único tratamiento estadísticamente distinto al Control que presentó los menores valores ( $0,08 \pm 0,01$  cmol(+)/L).

Para el caso de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), se observaron diferencias significativas en los dos periodos de muestro. A los 78 días el tratamiento Descompactador+Enmienda presentó el valor más alto ( $10,35 \pm 0,24$  cmol(+)/L), seguido del Palín Mecánico+Enmienda ( $10,01 \pm 0,71$  cmol(+)/L), ambos estadísticamente distintos al Palín Mecánico, en el cual se observó el valor más bajo ( $6,96 \pm 0,33$  cmol(+)/L). Ninguno de

los tratamientos fue estadísticamente significativo ( $p>0,05$ ) con respecto al control. No así a los 173 días, donde el control presentó el menor valor de CICE con  $8,16\pm 0,21$  cmol(+)/L y fue significativamente diferente al Descompactador+Enmienda que fue el tratamiento con mayor valor ( $11,44\pm 0,97$  cmol(+)/L).

**Cuadro 7.** Efecto de la labranza y enmiendas sobre el contenido de bases y la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo analizadas en dos momentos, letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo.

DDAT	Tratamientos	Ca cmol(+)/L	Mg cmol(+)/L	K cmol(+)/L	CICE cmol(+)/L
78	Subsolador	4,81±0,43 <sup>cd</sup>	2,14±0,24 <sup>a</sup>	0,09±0,01 <sup>ab</sup>	7,92±0,70 <sup>ab</sup>
	Palín Mecánico	3,99±0,27 <sup>d</sup>	1,94±0,13 <sup>a</sup>	0,08±0,01 <sup>b</sup>	6,96±0,33 <sup>b</sup>
	Descompactador	5,37±0,40 <sup>abcd</sup>	2,24±0,14 <sup>a</sup>	0,08±0,01 <sup>b</sup>	8,49±0,37 <sup>ab</sup>
	Subsolador más Enmienda	6,29±0,70 <sup>abc</sup>	2,29±0,22 <sup>a</sup>	0,12±0,02 <sup>ab</sup>	9,28±0,78 <sup>ab</sup>
	Palín Mecánico más Enmienda	7,03±0,64 <sup>ab</sup>	2,37±0,19 <sup>a</sup>	0,15±0,02 <sup>a</sup>	10,01±0,71 <sup>a</sup>
	Descompactador más Enmienda	7,40±0,34 <sup>a</sup>	2,46±0,10 <sup>a</sup>	0,13±0,02 <sup>ab</sup>	10,35±0,24 <sup>a</sup>
	Control	4,97±0,06 <sup>bcd</sup>	2,17±0,12 <sup>a</sup>	0,07±0 <sup>b</sup>	8,54±0,47 <sup>ab</sup>
173	Subsolador	5,78±0,42 <sup>abc</sup>	2,63±0,13 <sup>a</sup>	0,09±0,01 <sup>ab</sup>	9,34±0,46 <sup>ab</sup>
	Palín Mecánico	5,45±0,50 <sup>bc</sup>	2,68±0,14 <sup>a</sup>	0,09±0,01 <sup>ab</sup>	9,21±0,52 <sup>ab</sup>
	Descompactador	5,92±0,51 <sup>abc</sup>	2,67±0,21 <sup>a</sup>	0,09±0,01 <sup>ab</sup>	9,48±0,52 <sup>ab</sup>
	Subsolador más Enmienda	7,06±0,79 <sup>abc</sup>	2,31±0,22 <sup>a</sup>	0,09±0,01 <sup>ab</sup>	10,02±0,84 <sup>ab</sup>
	Palín Mecánico más Enmienda	8,19±0,83 <sup>ab</sup>	2,69±0,25 <sup>a</sup>	0,13±0,01 <sup>a</sup>	11,32±0,95 <sup>ab</sup>
	Descompactador más Enmienda	8,34±0,81 <sup>a</sup>	2,68±0,27 <sup>a</sup>	0,11±0,01 <sup>ab</sup>	11,44±0,97 <sup>a</sup>
	Control	4,92±0,26 <sup>c</sup>	2,31±0,12 <sup>a</sup>	0,08±0,01 <sup>b</sup>	8,16±0,21 <sup>b</sup>

DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Ca: calcio; Mg: magnesio; K: potasio; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; cmol(+)/L: centimoles por litro; ±: error estándar

*Nitrógeno y Micronutrientes del suelo*

Los tratamientos no mostraron efecto en el contenido de nitrógeno del suelo en ninguno de los periodos de muestreo, ya que todos los tratamientos mostraron valores relativamente similares tanto a los 78 como a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos, por lo que ninguno de ellos presentó diferencias significativas.

De igual manera el contenido de hierro no cambió significativamente en los primeros 78 días. Sin embargo, a los 173 días donde el Subsolador+enmienda presentó el menor valor de hierro ( $152 \pm 7,29$  mg/L) y fue estadísticamente distinto del tratamiento Descompactador, que presentó el valor más alto ( $209 \pm 10,98$  mg/L). Sin embargo, ninguno de los tratamientos mostro diferencia significativa con respecto al control en el segundo muestreo.

Caso contrario sucedió con los resultados obtenidos con respecto al manganeso, donde si se encontraron diferencias significativas en la primera fecha de muestreo (78DDAT), mas no así, a los 173 días, donde a pesar de que los tratamientos con enmienda presentaron menores valores que los tratamientos sin enmienda y el Control, ninguno fue estadísticamente distinto. Cabe destacar que a los 78 días los tratamientos que obtuvieron los valores más bajos fueron el Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda con  $62,25 \pm 2,84$  mg/L y  $63,5 \pm 5,20$  mg/L respectivamente, los cuales fueron estadísticamente distintos al Subsolador que presentó el valor más alto ( $111,25 \pm 8,66$  mg/L). Sin embargo, ninguno de los tratamientos fue estadísticamente distinto al Control.

Los resultados obtenidos para el zinc, mostraron que los tratamientos no tuvieron efecto significativo sobre el contenido de este elemento en el suelo, en ninguno de los periodos de muestreo. En cuanto al contenido de cobre, no se encontró diferencia significativa entre tratamientos a los 78 días después de su aplicación. Sin embargo, a los 178 días los resultados si muestran diferencias, donde el Subsolador+Enmienda es significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que el Palín Mecánico+Enmienda, cuyos valores fueron de  $17 \pm 0,71$  mg/L y  $21,75 \pm 0,75$  mg/L respectivamente.

**Cuadro 8.** Efecto de la labranza y enmiendas sobre el nitrógeno y los micronutrientes del suelo analizados en dos momentos, letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo.

DDAT	Tratamientos	N (%)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)
78	Subsolador	0,30±0,02 <sup>a</sup>	172,5±22,37 <sup>a</sup>	111,25±8,66 <sup>a</sup>	3,52±0,74 <sup>a</sup>	19,25±0,63 <sup>a</sup>
	Palín Mecánico	0,29±0,01 <sup>a</sup>	146,25±11,99 <sup>a</sup>	82±4,10 <sup>ab</sup>	2,35±0,29 <sup>a</sup>	17,25±0,48 <sup>a</sup>
	Descompactador	0,29±0,01 <sup>a</sup>	161,75±12,77 <sup>a</sup>	89,25±18,11 <sup>ab</sup>	3,72±0,52 <sup>a</sup>	21,25±1,80 <sup>a</sup>
	Subsolador más Enmienda	0,29±0,02 <sup>a</sup>	123±18,26 <sup>a</sup>	63,5±5,20 <sup>b</sup>	3,65±1,43 <sup>a</sup>	18,25±1,44 <sup>a</sup>
	Palín Mecánico más Enmienda	0,31±0,01 <sup>a</sup>	122,75±9,36 <sup>a</sup>	62,25±2,84 <sup>b</sup>	4,65±0,74 <sup>a</sup>	18,5±1,04 <sup>a</sup>
	Descompactador más Enmienda	0,32±0,02 <sup>a</sup>	144±6,07 <sup>a</sup>	66,5±12,66 <sup>ab</sup>	4,75±0,52 <sup>a</sup>	18,5±1,71 <sup>a</sup>
	Control	0,29±0,01 <sup>a</sup>	142,5±2,96 <sup>a</sup>	99,25±10,63 <sup>ab</sup>	3,6±1,01 <sup>a</sup>	18,25±0,85 <sup>a</sup>
173	Subsolador	0,31±0,01 <sup>a</sup>	205,25±15,04 <sup>ab</sup>	68,5±11,21 <sup>a</sup>	3,22±0,48 <sup>a</sup>	18,75±0,75 <sup>ab</sup>
	Palín Mecánico	0,29±0,01 <sup>a</sup>	206,25±10,54 <sup>ab</sup>	81,75±17,60 <sup>a</sup>	2,82±0,46 <sup>a</sup>	19±0,58 <sup>ab</sup>
	Descompactador	0,31±0,01 <sup>a</sup>	209±10,98 <sup>a</sup>	74,25±8,66 <sup>a</sup>	4,3±0,91 <sup>a</sup>	19,5±1,50 <sup>ab</sup>
	Subsolador más Enmienda	0,29±0,02 <sup>a</sup>	152±7,29 <sup>b</sup>	41,25±4,27 <sup>a</sup>	2,75±1,04 <sup>a</sup>	17±0,71 <sup>b</sup>
	Palín Mecánico más Enmienda	0,29±0,01 <sup>a</sup>	187,5±17,73 <sup>ab</sup>	63,25±11,45 <sup>a</sup>	4,05±0,64 <sup>a</sup>	21,75±0,75 <sup>a</sup>
	Descompactador más Enmienda	0,32±0,02 <sup>a</sup>	190,5±5,56 <sup>ab</sup>	52,75±6,21 <sup>a</sup>	4,12±0,69 <sup>a</sup>	20,25±1,18 <sup>ab</sup>
	Control	0,30±0,02 <sup>a</sup>	193±12,12 <sup>ab</sup>	69,75±4,71 <sup>a</sup>	2,5±0,37 <sup>a</sup>	18,75±0,48 <sup>ab</sup>

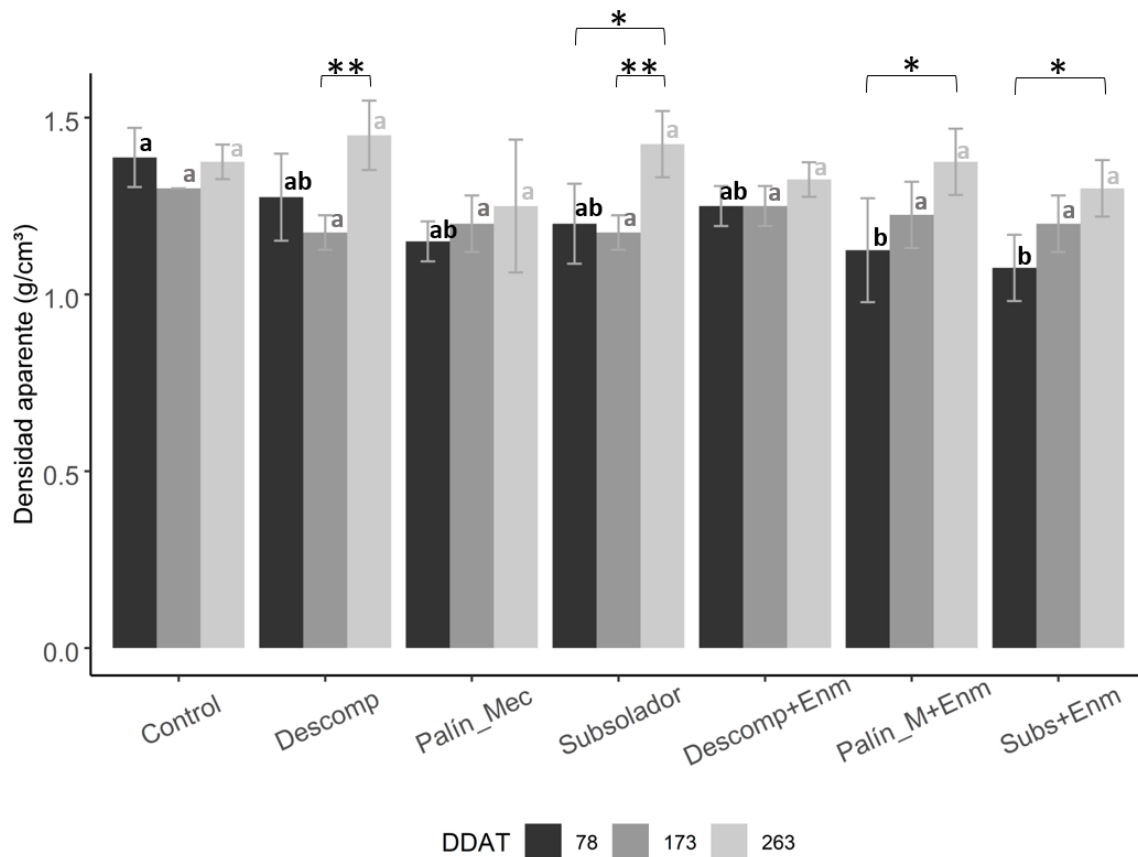
DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; N: nitrógeno; Fe: hierro; K: potasio; Mn: manganeso; Zn; zinc; Cu: cobre; mg/L: miligramos por litro; ±: error estándar

### Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades físicas del suelo.

#### *Densidad aparente*

Bajo los sistemas de labranza implementados en este estudio, las propiedades físicas del suelo se vieron afectadas por los distintos tratamientos. En particular, la densidad aparente se vio reducida en todos los tratamientos en comparación con el Control, el cual, a los 78 días después de la aplicación los tratamientos, mostró el valor más alto de este parámetro, con 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Este valor control fue significativamente distinto a los tratamientos de Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda, que obtuvieron los valores más bajos (1,1 y

1,0 g/cm<sup>3</sup> respectivamente) en este periodo. Este comportamiento no se mantuvo a los 173 y 263 días, periodos en los que no se observaron diferencias significativas. Sin embargo, se presentaron incrementos significativos en los valores de densidad aparente entre fechas de muestreo por tratamiento. Para el caso del Descompactador y Subsolador el incremento se observó a los 263 días comparados con los valores observados a los a los 173 días. De igual manera, el Subsolador, Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda presentaron dicho incremento en comparación con los valores obtenidos a los 78 días.



DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; (\*):  $p < 0,05$ , (\*\*):  $p < 0,01$ , (\*\*\*) :  $p < 0,001$ .

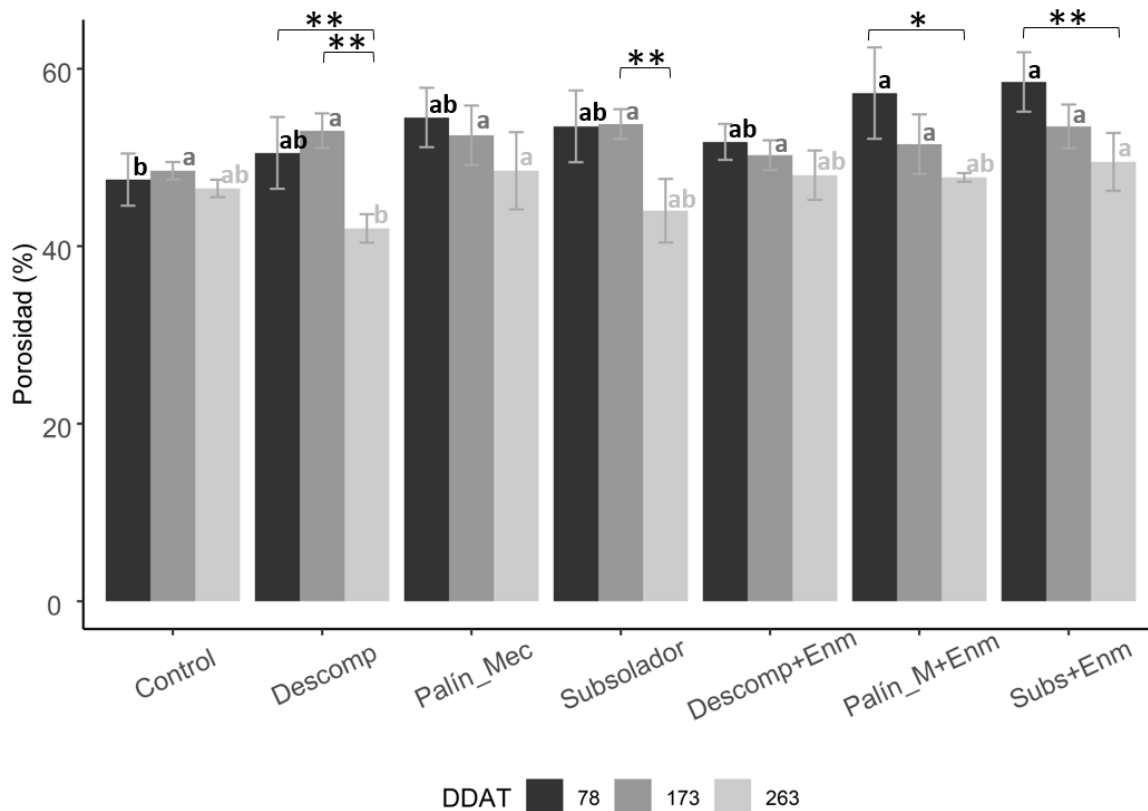
**Figura 5.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la densidad aparente del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos. Las barras de error indican intervalos de confianza. Letras distintas del mismo color indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. Los asteriscos

indican diferencias significativas honestas de Tukey por tratamientos entre fechas de muestreo.

### *Porosidad*

De manera consistente con los resultados obtenidos con la densidad aparente, se observa que la porosidad presentó un comportamiento similar, en el que todos los tratamientos logran un incremento en los valores de porosidad del suelo en relación con el Control, que presentó un valor de 47,61 %. Siendo significativamente diferente al Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda, que fueron los tratamientos con mayor porosidad y que reportaron valores de 57,19 y 58,26 % respectivamente a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos. A los 173 días, donde, a pesar de que los tratamientos mostraron mayor porosidad que el Control, no presentaron diferencias significativas. A los 263 días el Subsolador+Enmienda y Palín Mecánico mostraron los valores más altos con 49,50 y 48,50 % respectivamente, siendo significativamente distintos del Descompactador, que presentó una porosidad de 42,50%, aunque no se distinguieron del Control. Existe una tendencia general en todos los tratamientos a la pérdida de porosidad con el tiempo, ya que se observó una reducción significativa de la porosidad a los 263 días en el tratamiento Descompactador comparado con los valores obtenidos a los 78 y 173 días de aplicados los tratamientos. Lo mismo sucede con el Subsolador comparado con los valores de porosidad de este mismo tratamiento a los 173 días y con el Palín Mecánico+Enmienda y Subsolado+Enmienda comparado con la porosidad obtenida a los 78 días.





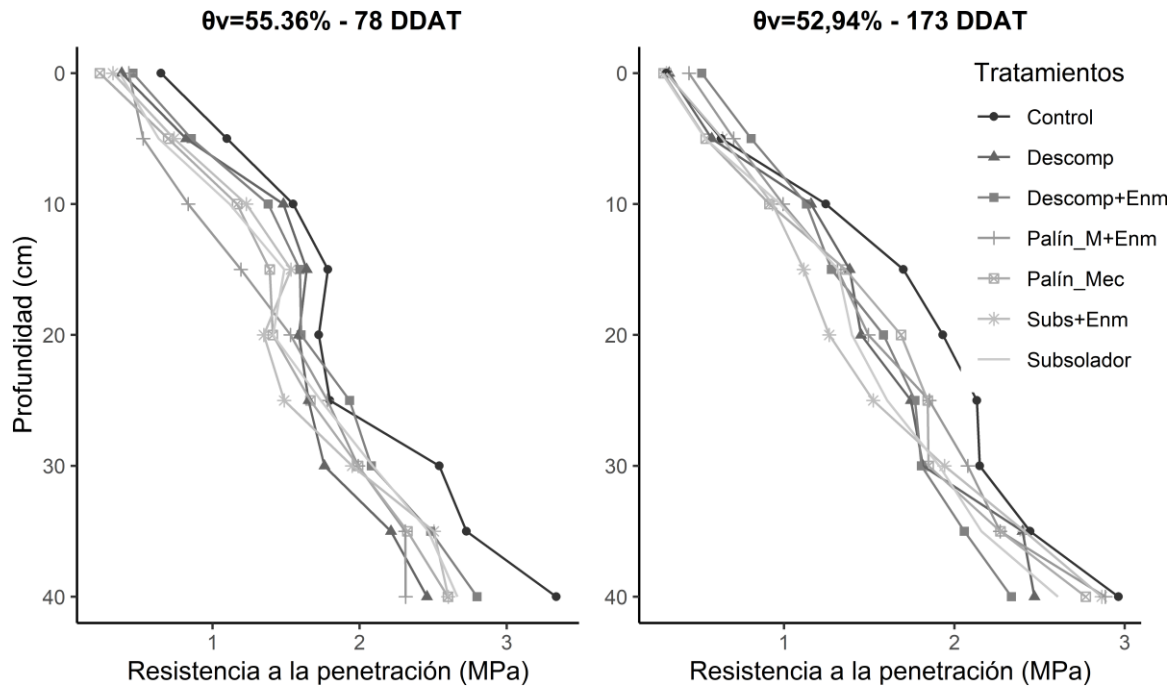
DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; (\*):  $p < 0,05$ , (\*\*):  $p < 0,01$ , (\*\*\*):  $p < 0,001$ .

**Figura 6.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la porosidad del suelo a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos. Las barras de error indican intervalos de confianza. Letras distintas del mismo color indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo. Los asteriscos indican diferencias significativas honestas de Tukey por tratamientos entre fechas de muestreo.

#### *Resistencia a la penetración*

Los análisis realizados en base a la resistencia a la penetración, mostraron un efecto positivo de todos los tratamientos sobre este parámetro a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Se observó una reducción de los valores en todas las profundidades evaluadas (0-40 cm) con relación al Control (ver Anexos), el cual presentó diferencias significativas a los 78 días a profundidades de 0-5, 6-10, 11-15 y de 36-40 cm. De igual manera, a los 173 días las diferencias se observaron a las profundidades de 0-5,

11-15 y de 16-20 cm. Los tratamientos de labranza y labranza+enmienda no fueron significativamente distintos entre sí, en ninguno de los periodos de muestreo.



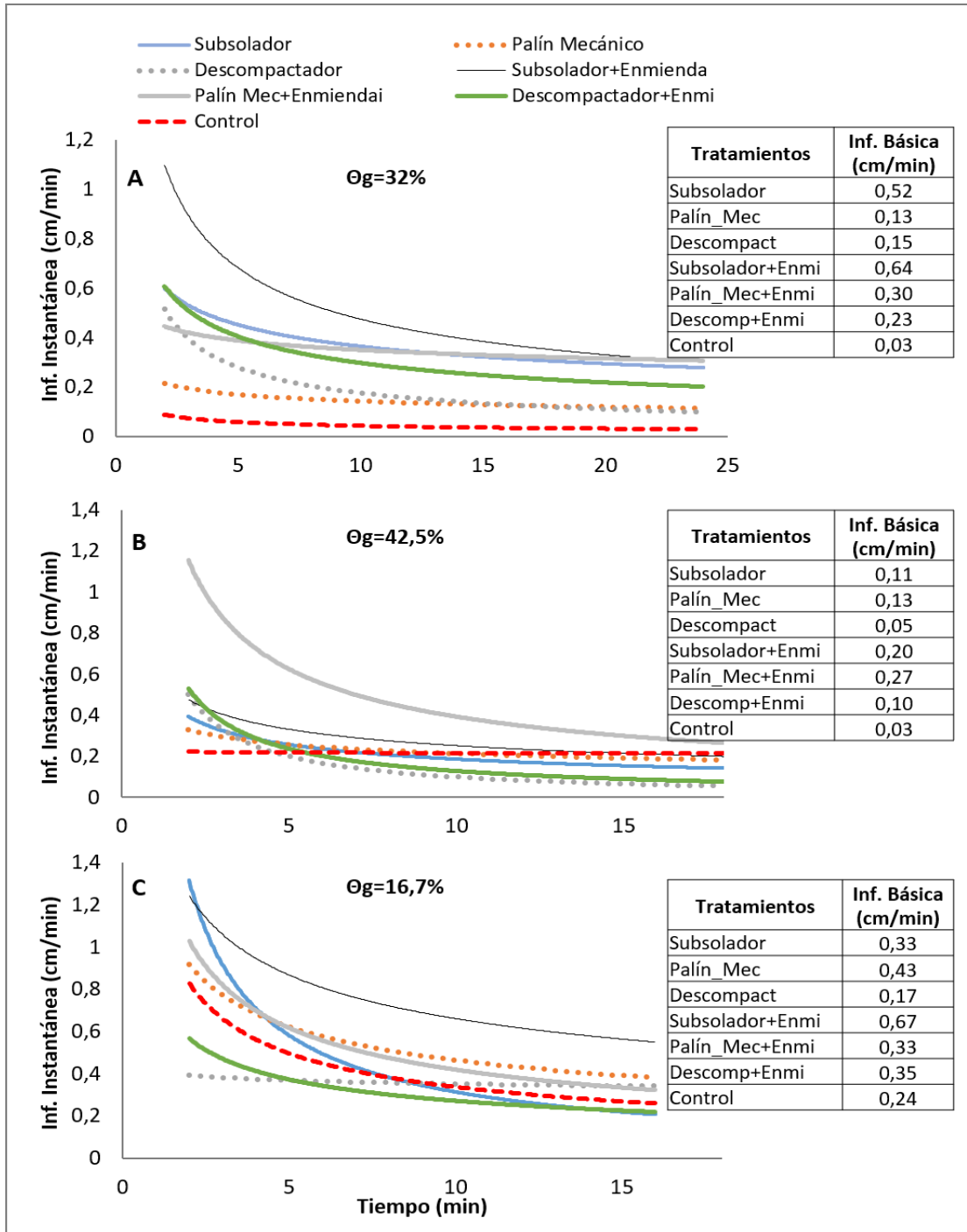
DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos;  $\theta_v$ : humedad volumétrica; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador

**Figura 7.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.

### *Infiltración*

El patrón de comportamiento de la velocidad de infiltración mostró variaciones en el tiempo y de acuerdo con la humedad inicial del suelo. A los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, destaca el Subsolador+Enmienda, mostrando los mayores valores de infiltración instantánea, seguido del Subsolador durante los primeros 17 minutos de evaluación, en este punto fue superado por el Palín Mecánico+Enmienda. Por su parte, el tratamiento Control obtuvo los menores valores. La infiltración instantánea se estabilizó cerca de los 15 minutos de evaluación para la mayoría de los tratamientos. De igual

manera el Subsolador+Enmienda y Subsolador presentaron la infiltración básica más alta con 0,64 y 0,52 cm/min respectivamente. Por el contrario, el Control alcanzó el valor más bajo con 0,03 cm/min. Luego de 173 días y con una alta humedad del suelo, destaca el Palín Mecánico+Enmienda, que presentó la mayor infiltración instantánea, seguido del Subsolador+Enmienda, el cual no superó por mucho a los demás tratamientos. En este periodo de análisis se observó un comportamiento distinto de casi todos los tratamientos, ya que en la primera etapa del experimento (primeros minutos) no se observó una caída abrupta de los valores de infiltración instantánea, los cuales se estabilizaron rápidamente cerca de los 9 minutos de evaluación. La mayor infiltración básica se presentó en el Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda con 0,27 y 0,20 cm/min respectivamente. Los datos de infiltración básica del tratamiento Control concuerdan con los observados a los 78 días, alcanzando el valor más bajo entre los tratamientos con 0,03 cm/min. A los 263 días, el Subsolador+Enmienda obtuvo la mayor infiltración instantánea, seguido del Subsolador en los primeros 5 minutos del experimento, cuando es superado por el Palín Mecánico y Palín Mecánico+Enmienda. El Subsolador+Enmienda y Palín Mecánico expresaron la mayor infiltración básica, con 0,67 y 0,43 cm/min respectivamente. En este punto, el Descompactador presentó el menor valor con 0,17 cm/min.

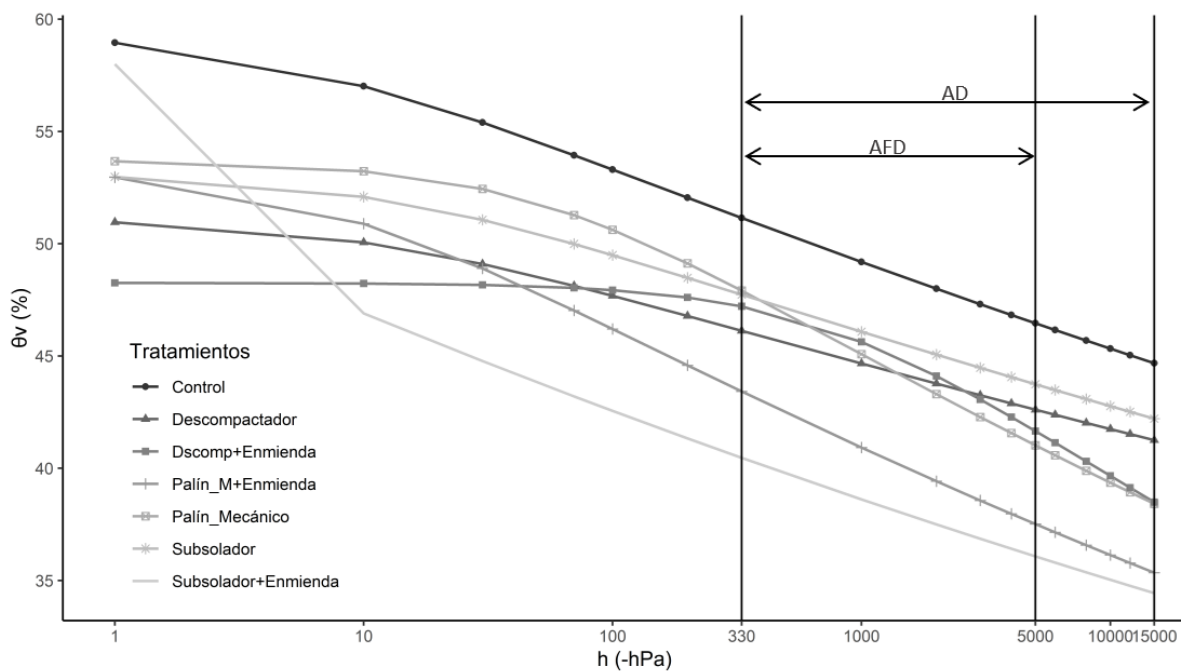


A: 78; B: 173; C: 263 días después de la aplicación de los tratamientos;  $\theta_g$ : humedad gravimétrica; Subs: Subsolador; Enmi: Enmienda; Palín\_Mec: Palín mecánico; Inf: infiltración

**Figura 8.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la infiltración instantánea y básica de acuerdo con el modelo de Kostiakov a los 78, 173 y 263 días después de la aplicación de los tratamientos.

### Retención de humedad

Los tratamientos con mayor disponibilidad de agua (rango de -h de 330-15000 hPa) fueron el Palín Mecánico y Descompactador+Enmienda con 9,50 y 8,72 % de humedad volumétrica, respectivamente. Estos resultados fueron mayores a los obtenidos en el Control, el cual presentó agua disponible de 6,47 %, a pesar de que el Control presentó el mayor contenido de humedad volumétrica en todas las tensiones evaluadas (0-15000 hPa). Sin embargo, los tratamientos que presentaron una retención de humedad con los mayores valores de agua fácilmente disponible (rango de -h de 330-5000 hPa) fueron el Palín Mecánico y Palín Mecánico+Enmienda con 6,89 y 5,91 % de humedad volumétrica respectivamente. Los cuales fueron superiores al Control, que presentó 4,69 % de agua fácilmente disponible en este rango de tensión.

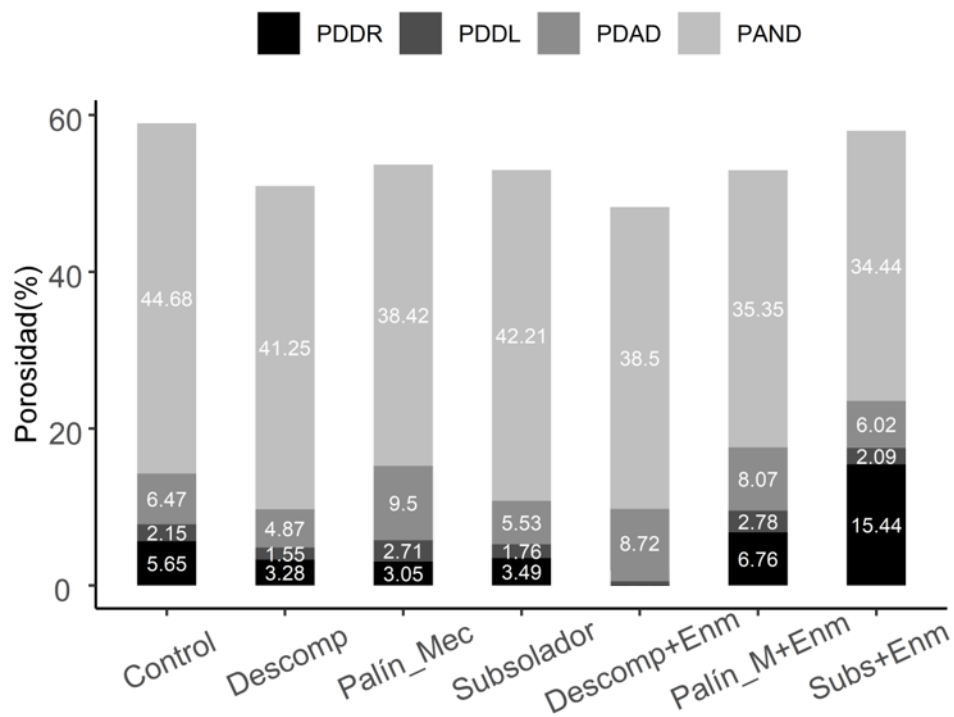


$\theta_v$ : humedad volumétrica; Palín\_M: Palín mecánico; AD: agua disponible; AFD: agua fácilmente disponible; h: potencial matricial; hPa: hectopascales

**Figura 9.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la retención de humedad de acuerdo con el modelo de van Genuchten los 78 días después de la aplicación de los tratamientos.

*Distribución de tamaño de poros*

El análisis de la curva de retención de humedad se usó para estimar la distribución de tamaño de poros, los cuales, fueron clasificados como poros de drenaje rápido ( $h > -100$  hPa), poros de drenaje lento ( $h -100$  y  $-330$  hPa), poros de agua disponible ( $h -330$  y  $-15000$  hPa) y poros de agua no disponible ( $h < -15000$  hPa). Los resultados fueron consistentes con los obtenidos en la curva de retención de humedad. Se encontró que el tratamiento con el mayor porcentaje de poros de agua disponible fue el Palín Mecánico con 9,50 % y el Descompactador+Enmienda, que a pesar de presentar la menor porosidad total muestra un 8,72 % de poros de agua disponible, siendo el tratamiento con el segundo valor más alto. A pesar de que el Control presentó el mayor porcentaje de porosidad total de acuerdo con la curva de retención, de igual manera, es el tratamiento con el mayor volumen de poros de agua no disponible con 44,68 % y tan solo un 6,47 % de poros de agua disponible. El Subsolador+Enmienda obtuvo el mayor porcentaje de poros de drenaje rápido con 15,44 %, seguido del Palín Mecánico+Enmienda con 6,76 %. En general, los tratamientos de labranza acompañados de enmienda (a excepción del Palín Mecánico) mostraron ser los tratamientos con mayor porcentaje de poros de agua disponible, comparados con el Subsolador y Descompactador, los cuales mostraron los valores más bajos comparados incluso con el tratamiento Control.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; PDDR: poros de drenaje rápido; PDDL: poros de drenaje lento; PDAD: poros de agua disponible; PAND: poros de agua no disponible

**Figura 10.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la distribución de tamaño de poros de acuerdo con la curva de retención de humedad a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos.

## DISCUSIÓN

### **Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades químicas del suelo.**

La calidad del suelo esta intrínsecamente relacionada con las interacciones entre sus agentes bióticos y abióticos, constituidos por sus propiedades químicas, físicas y biológicas, las cuales son las responsables del balance dinámico y el equilibrio ecológico, el cual puede ser fácilmente alterado por el uso de la tierra, los sistemas de labranza inapropiados y el manejo de los cultivos (Balesdent et al., 2000).

#### *Acidez del suelo*

Los tratamientos de labranza y enmienda mostraron una mejoría en las propiedades relacionadas con la acidez del suelo. Al evaluar la acidez a los 78 y 173 días se logró observar una reducción de este parámetro con los tratamientos de labranza más enmienda en comparación con el control. Encontrando valores incluso por debajo del nivel crítico (0,50 cmol(+)/L) para el caso de los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda en ambos periodos de evaluación. No así para los tratamientos de solo labranza, los cuales presentaron valores similares al control y por encima del nivel crítico. Estos resultados están asociado directamente a la naturaleza ácida de los suelos rojos como es el caso de los Ultisoles, cuya arcilla predominante es la caolinita de configuración 1:1 (Southard & Southard, 1987; Schwertmann & Herbillon, 1992), con un alto potencial para degradarse y liberar aluminio, que en presencia de agua se disocia (hidroliza), incorporando iones  $H^+$  a la solución del suelo, lo que genera un incremento de la acidez del sustrato (Ames & Castillo, 2014). Por otro lado, la aplicación de una enmienda calcárea ( $CaCO_3$ ), actúa reduciendo los niveles de acidez del suelo (Chaplain et al., 2011). Esta reducción se da básicamente como resultado de la neutralización de la acidez originada por formas intercambiables de  $Al^{+3}$ ,  $H^+$ , y/o  $Mn^{+2}$  (Kamprath, 1984). Los hallazgos de este estudio son consistentes con los resultados obtenidos por Rheinheimer et al. (2018), quienes aplicaron una enmienda de cal en distintas dosis en un Ultisol, reduciendo los valores de acidez en los primeros 10 cm del suelo. Resultados similares fueron encontrados por Cifu et al. (2004) en un experimento donde evaluaron la aplicación



de cal en un suelo rojo ácido bajo cultivo y su efecto sobre la acidez, obteniendo como resultado la reducción de este parámetro en los primeros 20 cm de profundidad.

Por su parte, ninguno de los tratamientos incrementó el pH por arriba del nivel crítico a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, pero, a los 173 superaron este nivel crítico los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda. Esto puede deberse a la alta capacidad buffer de los coloides minerales y orgánicos de carga variable que tienden a estabilizar el pH en estos suelos (Osorno & Osorno, 2010). La saturación de acidez también fue influenciada positivamente por los tratamientos de labranza con enmienda, presentando estos un valor óptimo (<10%) en las dos etapas de evaluación (78 y 173 días) al igual que el Descompactador. Los demás tratamientos, incluido el Control, se mantuvieron en los valores medios (10-30%). Ninguno de los tratamientos presentó diferencia significativa con respecto al Control a los 78 días. Fue hasta el segundo muestreo (173 días), que los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda presentaron diferencia significativa con respecto al Control. Esta diferencia significativa en el pH y la saturación de acidez a los 173 días puede estar asociada a que la acción de los materiales en calates tiende a presentar mayor efectividad luego de cierto tiempo, que, de acuerdo con la calidad del material, este logra en su totalidad reaccionar químicamente en el suelo (Molina & Rojas, 2005). Resultados similares fueron encontrados por Irkiso, (2014) en un estudio en el que evaluaron distintas dosis de cal, obteniendo como resultados un incremento de los valores de pH y una disminución en la saturación de acidez. Así mismo, Molina & Rojas, (2005) también encontraron el mayor efecto sobre los valores de pH y saturación de acidez luego de 12 meses de la aplicación de la enmienda.

#### *Bases del suelo*

El efecto de los tratamientos fue particularmente notorio en el contenido de calcio del suelo, que, para el caso específico de los tratamientos de labranza con enmienda, los valores de esta base fueron incrementados a un nivel óptimo (6-15 cmol(+)/L), a diferencia del Palín Mecánico, que, a los 78 días presentó valores por debajo del nivel crítico (<4 cmol(+)/L) y los demás tratamientos que presentaron valores medios (4-6 cmol(+)/L) a lo largo del experimento. Por otro lado, el contenido de magnesio no se vio alterado por los

tratamientos en ninguno de los periodos de muestreo. Esto se asocia principalmente a la fuente de encalado utilizada en este estudio ( $\text{CaCO}_3$ ), la cual está constituida principalmente por 39,3% de Ca y solamente un 0,1% de Mg (ver Cuadro 2), la cual representa un aporte directo de calcio y a su vez, representa la fuente de encalado más utilizada en Costa Rica por su abundancia y costos reducidos (Molina & Rojas, 2005). Sin embargo, con el fin de incrementar también el contenido de magnesio en los suelos, podría ser más conveniente el uso de cal dolomítica como material encalate, aunque, el uso de esta enmienda resulta también en un incremento en los costos, puesto que esta fuente debe ser importada desde el extranjero (Molina, 1998). Los resultados de este estudio concuerdan con los encontrados por Pinzón et al. (1980), en un estudio en Panamá, en el cual se llevó a cabo la aplicación de  $\text{CaCO}_3$  en dosis creciente en suelos ácidos, obteniendo como resultado el incremento de contenido de calcio de forma lineal en base a la cantidad de enmienda utilizada, lo cual no sucedió con el contenido de magnesio, cuyos valores no fueron alterados significativamente por los tratamientos. De igual forma Carrizo *et al.* (2014) evaluaron el efecto de enmiendas calizas, dolomíticas y mezcla de ambas sobre la acidez y las bases del suelo, determinando que todas las enmiendas incrementaron significativamente el calcio y magnesio del suelo, a excepción de la enmienda caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), la cual no tuvo efecto significativo sobre el magnesio. Los resultados de este estudio también son consistentes con los hallazgos de Cifu et al. (2004) en un experimento donde evaluaron la aplicación de cal en un suelo rojo ácido bajo cultivo sobre las propiedades químicas del suelo, obteniendo como resultado un incremento en los valores de calcio en los primeros 20 cm de profundidad.

El incremento relativo del potasio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva en los tratamientos de labranza con enmienda en función de los tratamientos de solo labranza y el Control, podría estar relacionado en este caso, por un lado a la aplicación de una enmienda orgánica cuyos materiales y proceso de preparación le brindan una alta riqueza de nutrientes (Pandit et al., 2020), la cual en este estudio representó un aporte del 2,48% de potasio de la masa total aplicada (Cuadro 1), que debido a la mineralización de los materiales orgánicos semidescompuestos que constituyen el fertilizante orgánico, permiten el incremento de los tenores de potasio y otros elementos en suelos de baja fertilidad en un corto periodo de tiempo (Liu et al., 2012). De igual forma, el incremento de los valores de

calcio y pH como efecto de la aplicación de una enmienda calcárea en estos suelos de carácter ácido como son los Ultisoles (Alvarado et al., 2014b), repercute en el incremento de la capacidad del suelo para retener cationes, limitando la pérdida de potasio y otros cationes por lixiviación (Rossetto et al., 2004). Sin embargo, el contenido de potasio en todos los tratamientos se mantuvo en valores por debajo del nivel crítico (0,02 cmol(+)/L) en ambos periodos de evaluación, dado que estos suelos se consideran como suelos muy meteorizados y de baja fertilidad cuyas bases en su mayoría han sido lavadas (Alvarado et al., 2014a; Molina & Rojas, 2005). Los resultados de este estudio son consistentes con los hallazgos de Liu et al. (2012) y Adugna (2018), en el que la aplicación de una enmienda orgánica resultó en un incremento significativo de varios elementos nutritivos del suelo incluyendo el potasio. De igual manera Pandit et al. (2020) evaluó la aplicación de distintos tipos de compost con y sin biocarbón en un cultivo de maíz y su efecto sobre la fertilidad del suelo, obteniendo como resultado el incremento de los valores de potasio y la capacidad de intercambio catiónico del mismo. También, Valerio & Molina. (2012) al evaluar la aplicación de una enmienda líquida de  $\text{CaCO}_3$  en un Ultisol cultivado con arroz, determinaron un incremento de la capacidad de intercambio catiónica efectiva al aplicar 10 L/ha de la enmienda.

#### *Nitrógeno y Micronutrientes del suelo*

Los tratamientos no afectaron el contenido de nitrógeno, zinc y cobre del suelo a lo largo de todo el experimento. Tanto el nitrógeno como los micronutrientes del suelo están sujetos a una serie de factores que afectan su contenido en el suelo, uno de los más importantes es la materia orgánica (Miretti et al., 2012). Esto concuerda con lo reportado por Mijangos *et al.* (2006), quienes encontraron que la ausencia de cambios de nitrógeno y otros micronutrientes del suelo aún luego de procesos de mecanización, se debe principalmente a que los suelos estudiados presentaron altos contenidos de materia orgánica. De acuerdo con los análisis de línea de base de nuestro estudio, el suelo antes de la aplicación de los tratamientos presentó 4,91% de materia orgánica, que es la fuente principal de reservas y suministro de nitrógeno y micronutrientes edáficos (Cassman et al., 1996; Curtin & Wen, 1999; Matus & Maire G., 2000) y que ayuda a mantener los valores de estos elementos relativamente constantes.

Los tratamientos de labranza con enmienda presentaron una reducción relativa del hierro y el manganeso comparados con los tratamientos sin labranza y el Control. Lo que se da por efecto de la neutralización del aluminio intercambiable, que permite la reducción del contenido de estos (Cordero & Chavarría, 1987). Sin embargo, no fueron significativamente distintos al Control. Además, todos los tratamientos presentaron valores altos de estos elementos en ambos periodos de muestreo, a excepción del Subsolador+Enmienda que presentó un valor óptimo de manganeso a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Debido a la naturaleza del suelo en estudio (Ultisol), estos presentan una acumulación de hierro y manganeso en su perfil (Alvarado et al., 2014b), que tienen tendencias al aumento en función del tiempo de meteorización (Wilcke et al., 2000), por lo que es normal encontrar valores altos de este elemento en estos suelos.

### **Efecto de la labranza y enmiendas sobre las propiedades físicas del suelo.**

#### *Densidad aparente y Porosidad*

La compactación depende de las características propias de cada suelo, como textura y estructura, las cuales, a su vez, son influenciadas por el cultivo que se implemente y su manejo (Montanari et al., 2010). Como indicador de la calidad del suelo, la densidad aparente y la porosidad juegan un papel importante (García et al., 2018). De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la reducción de la densidad aparente y el consecuente incremento de la porosidad observada a los 78 días, está directamente relacionado a los sistemas de labranza implementados, que permiten el aflojamiento del suelo, rompiendo la continuidad de meso y microporos edáficos, promoviendo de esta manera una reducción temporal de la densidad edáfica y un incremento de poros de mayor tamaño (Kay & VandenBygaart, 2002), y que además, genera una ruptura de las capas compactadas (Demuner-Molina et al., 2014). En este sentido destacan los tratamientos de Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda, puesto que, la densidad aparente y porosidad pueden verse favorecidos por una buena estructuración del suelo producto de la actividad microbiana al descomponer los residuos orgánicos aplicados (Martínez et al., 2010). El detrimento en estos parámetros experimentado por los tratamientos luego de 173 y 263 días, sugiere que los cambios en los atributos físicos del suelo por efecto de la labranza no son permanentes. Dependiendo de las características del suelo su manejo las

condiciones edáficas tienden a regresar a los valores previos a la labranza, y en otros casos pueden alcanzar incluso niveles de deterioro, que en conjunto con la acción de la lluvia y el peso del suelo generan un asentamiento natural, revirtiendo los cambios físicos generados por la labranza (Ohep et al., 1994). Nuestros resultados concuerdan con los obtenidos por Hu et al. (2018), en un estudio donde se evaluó el efecto de la labranza a corto plazo, sobre las propiedades físicas del suelo bajo producción de pasto en condiciones de compactación, mejorando estas de manera significativa y reduciendo la compactación en los primeros 20 cm de profundidad. Sin embargo, estas mejoras fueron desapareciendo con el tiempo por efecto de la recuperación natural de las propiedades originales del suelo. Por su parte, García et al. (2018) determinó que los sistemas de labranza que no alteran el perfil natural del suelo con mecanismos de inversión de prisma tienden a mejorar la densidad y porosidad del suelo.

#### *Resistencia a la penetración*

Como indicador de la calidad del suelo, la resistencia a la penetración es un parámetro base para determinar el grado de deterioro que posee un suelo y que permite evaluar el efecto de los sistemas de labranza y el tránsito de maquinaria sobre las propiedades edáficas (Jiménez et al., 1992). Sin embargo, está condicionada a los cambios hídricos que sufra el suelo, por lo cual es importante que los datos de resistencia a la penetración siempre estén reportados con la humedad del suelo (Santana et al., 2014). Los resultados obtenidos en nuestro estudio muestran una mejoría significativa de este parámetro en los tratamientos en comparación al control, que, a pesar del alto contenido de humedad del suelo a la hora de la evaluación ( $\theta_v = 55,36\%$  y  $52,94\%$  a los 78 y 173 DDAT respectivamente), siempre mostró los valores más altos. Esto podría deberse a que las pasturas utilizadas por periodos largos y sometidos a pastoreo presentan valores de resistencia a la penetración de hasta 4,5 MPa en los primeros 20 cm de profundidad, (Martínez & Zinck, 2004), valores que son extremadamente altos, si se considera que el valor crítico de resistencia a la penetración es 2 MPa como limitante para el crecimiento y desarrollo de las raíces encargadas de la absorción (Tormena, da Silva, & Libardi, 1999). La diferencia significativa encontrada por los tratamientos de labranza comparados con el control de acuerdo con Baker et al. (2008), se asocian a que los sistemas agrícolas, donde los procesos de remoción de suelo son

limitados, propicia su estructuración, con lo que aumenta la humedad de este y facilitan la penetración radicular y por ende una reducción de la resistencia a la penetración. Nuestros resultados concuerdan con los reportados por Demunerm-Molina et al. (2014) y Martínez *et al.* (2008) quienes determinaron que la restricción mecánica en suelos compactados puede ser corregida de forma efectiva mediante la implementación oportuna y adecuada de sistemas de labranza con subsolador y otros implementos de cinceles, que permiten la ruptura de capas adensadas y disminuir la resistencia a la penetración. Martínez & Zinck (2004) determinaron que la transición de bosque a pastos con antigüedad de más de 12 años fue estimada de 0,45 MPa bajo bosque y 4,25 MPa en pastos antiguos, producto del manejo, el tránsito animal y el uso de maquinaria pesada. Los incrementos de resistencia a la penetración observados en todos los tratamientos en función de la profundidad son consistentes con lo reportado por Camacho et al. (2015) y Vallejos et al. (2014), quienes afirman que la compactación evaluada por medio de la resistencia a la penetración incrementa en función de la profundidad del suelo.

### *Infiltración*

Un suelo compactado, por ejemplo, presentará un aumento de densidad aparente, que se traduce también en el incremento en la resistencia a la penetración, con la consiguiente reducción de la porosidad y que también tendrá influencia directa en la infiltración (Mendoza M, 2021). El patrón de comportamiento de la infiltración se vio favorecido por los tratamientos comparados con el control a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, que presentó los valores más bajos al igual que los valores de infiltración básica. Lo que demuestra que la cero labranza no siempre tiene efectos positivos en las propiedades del suelo sobre todo si las condiciones iniciales del suelo presentan deterioro (Hartmann et al., 2012). Como consecuencia, se estará trabajando sobre un sistema edáfico superficial denso, sobre todo durante los primeros años de adopción de este sistema de manejo sin labranza, que como consecuencia dificulta el desplazamiento del agua y aire a través del perfil (Kay & VandenBygaart, 2002; Nunes et al., 2015). Los valores más altos encontrados en los tratamientos de Subsolador y Subsolador+Enmienda según Camacho et al. (2015) responden a que la labranza mecanizada modifica de forma significativa atributos físicos de suelo, como es la reducción de la densidad aparente y un aumento de la porosidad

total en función de la profundidad de trabajo del implemento, en comparación con suelos sin labrar. Luego de 173 y 263 días, los tratamientos de Palín Mecánico y Palín Mecánico+Enmienda expresaron los valores más bajos de infiltración instantánea, siendo superados incluso por el control. La reducción en la infiltración en estos tratamientos sugiere que los cambios en los atributos físicos del suelo por efecto de la labranza no siempre son permanentes. En dependencia de las características del suelo y el manejo las condiciones tienden a regresar a los valores previos a la labranza, y en otros casos pueden alcanzar incluso niveles de deterioro (Ohep et al., 1994). A diferencia del arado de discos, el subsolador no produce volteo del suelo y deja los rastrojos de cosechas anteriores sobre la superficie del suelo, lo que propicia la reducción de la velocidad de escurrimiento superficial de agua, garantizando una mejor infiltración (Cáceres Uscca, 2017).

#### *Retención de humedad y distribución de tamaño de poros*

La materia orgánica del suelo es una de las principales responsables del mantenimiento de las propiedades del suelo, dentro de las que destaca la retención de humedad, principalmente cuando el suelo es sometido a procesos de laboreo (Jamioy Orozco et al., 2015; Z; Liu et al., 2021). Sin embargo, los sistemas de labranza que no causan disturbios significativos en el perfil del suelo y no alteran los residuos orgánicos superficiales, presentan una tendencia al incremento de la humedad del suelo (Mendoza M., 2021). Los altos contenidos de humedad que muestra el suelo aun, a tensiones superiores al punto de marchitez permanente, sugiere que los suelos viejos altamente meteorizados como los Ultisoles, en su mayoría presentan predominancia de caolinita, lo que les confiere una baja capacidad de expandirse y contraerse permitiendo una alta retención de humedad por periodos prolongados de tiempo (West et al., 1997). Por otro lado, el rol de la estructura es fundamental en el flujo, distribución y retención del agua del suelo, por lo que cualquier perturbación en el sistema edáfico que afecte la distribución y arreglo de sus agregados, se traducirá en un proceso de deterioro, el cual tiene relación directa con la compactación del suelo y las relaciones hídricas suelo-planta (Osuna-Ceja et al., 2006). Lo que explica que el tratamiento Control mostrara siempre los mayores valores de humedad volumétrica, no así el contenido de humedad disponible y fácilmente disponible en lo cual se destacaron los tratamientos de Palín Mecánico, Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda.

Esto podría deberse a que los suelos viejos que presentan alto contenido de arcilla como el suelo en estudio, generalmente presentan una capa compactada en su superficie, la cual afecta los procesos de infiltración y retención de agua disponible, debido a la predominancia de poros de tamaño pequeño (Martínez et al., 2008), explicando el por qué el Control mostró el mayor valor de poros de agua no disponible, por lo que no labrar el suelo en estas condiciones tendrá un efecto negativo en la humedad y el desarrollo de los cultivos (Hartmann et al., 2012). Por otro lado, Baker et al. (2008), manifiestan que los sistemas agrícolas, donde los procesos de remoción de suelo son limitados (como los implementos utilizados en este estudio), propicia la estructuración del suelo, con lo que aumenta la humedad de este y facilita la penetración radicular. A su vez, las operaciones de labranza no tienen efecto significativo en la estabilidad estructural de un suelo, salvo que este sea sometido a operaciones de labranza muy frecuentes y repetidas durante un periodo determinado (Rodríguez, 1998). También, la labranza mecanizada afecta positivamente el porcentaje de mesoporos, (Ceballos et al., 2010), lo que resulta de suma importancia pues los mesoporos son los encargados de la retención de agua fácilmente disponible (retenida a tensiones bajas) para las plantas (Rivera et al., 2017). Los sistemas de labranza tienen un efecto inherente sobre la estructura del suelo, causando cambios al arreglo geométrico de su sistema poroso y estructural (Osuna-Ceja et al., 2006). Los resultados obtenidos en la distribución de tamaño de poros concuerdan con los encontrados por Martínez et al. (2008) en el que se comparó el efecto de la labranza sobre los poros de drenaje rápido, encontrando que los tratamientos de labranza mostraron mayores valores de drenaje rápido comparados con el control sin labranza.



## CONCLUSIONES

Los tratamientos de labranza por si solos, no tuvieron un efecto estadístico importante sobre las propiedades químicas del suelo, no así, para los tratamientos de labranza + enmienda, por lo que la adición de una enmienda calcárea y orgánica en estas condiciones es imprescindible para el mejoramiento de la calidad química del suelo en función de la producción vegetal.

Los tratamientos de labranza mecanizada tuvieron un efecto positivo en la mayoría de las propiedades físicas, donde se observó una reducción de la resistencia a la penetración, densidad aparente y un incremento en la infiltración, porosidad y retención de humedad, incluso aún más cuando fueron aplicados con una enmienda calcárea y orgánica. Los resultados más promisorios fueron observados en los tratamientos del Palín Mecánico más Enmiendas y Subsolador más enmiendas.

## LITERATURA

- Adugna, G. (2018). A review on impact of compost on soil properties, water use and crop productivity. *Agricultural Science Research Journal*, 4(3), 93-104.
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014a). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75-106.
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014b). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: II. mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliníticas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 107-131.
- Álvarez-Solís, J. D., & Anzueto-Martínez, M. de J. (2004). Soil microbial activity under different corn cropping systems in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Agrociencia*.
- Ames, J. B., & Castillo, E. B. (2014). Estudio comparativo de la mineralogía y los coloides arcillosos en suelos de trópicos húmedos. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 4(2), 222-231.
- Amezquita, E. (1999). Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. *Palmas*, 20(1), Art. 1.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25-45.

- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53(3), 215-230.
- Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, W. R., Chamen, W. C., Reicosky, D. C., Ribeiro, M. F., Hobbs, P. R. (2008). Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación. Zaragoza-España: *FAO-ACRIBIA*, S.A.
- Cáceres Uscca, R. E. (2017). Habilitación de praderas nativas compactadas a través de sistemas de labranza en un ecosistema del altiplano Puno. Puno-Perú: *Universidad Nacional del Altiplano*
- Cadena, B. P., Egas, D., Eraso, M. H. R., Mosquera, J., & Benavides, O. (2012). Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo Vitric Haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2), 116-128.
- Camacho, M. E., Cabalceta-Aguilar, G., & Molina-Rojas, E. (2015). Efecto de las enmiendas líquidas en un Ultisol cultivado con sorgo. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 291.
- Camacho, M. E., Mata, R., Forsythe, W. (2015). Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas. *Agronomía Costarricense*, 39, 101-115.
- Carrizo, M. E., Alesso, C. A., Billoud, H., & Pilatti, M. Á. (2014). Comparación del poder de neutralización de enmiendas calcáreo-magnésicas en suelos de la Pampa llana santafesina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 46(2), 73-82.

- Cassman, K. G., Dobermann, A., Cruz, P. C. S., Gines, G. C., Samson, M. I., Descalsota, J. P., Alcantara, J. M., Dizon, M. A., & Olk, D. C. (1996). Soil organic matter and the indigenous nitrogen supply of intensive irrigated rice systems in the tropics. *Plant and Soil*, 182(2).
- Ceballos, D., Hernández I, O. & Velez L, J. (2010). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del departamento de nariño. *Revista de agronomía*, 1, 40-48.
- Chaplain, V., Défossez, P., Delarue, G., Roger-Estrade, J., Dexter, A. R., Richard, G., & Tessier, D. (2011). Impact of lime and mineral fertilizers on mechanical strength for various soil pHs. *Geoderma*, 167-168, 360-368.
- Chauhan, N., Sankhyan, N. K., Sharma, R. P., Singh, J., & Gourav. (2020). Effect of long-term application of inorganic fertilizers, farm yard manure and lime on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity, quality and nutrient content in an acid alfisol. *Journal of Plant Nutrition*, 43(17), 2569-2578.
- Cifu, M., Xiaonan, L., Zhihong, C., Zhengyi, H., & Wanzhu, M. (2004). Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. *Plant and Soil*, 265(1), 101-109.
- Cordero, A., & Chavarría, A. (1987). Encalado de Ultisoles en Costa Rica. II. Aniones (P, B,S) y elementos menores catiónicos (Fe, Cu, Zn, Mn). *Turrialba Volumen 37*,(1), 59-70.
- Curtin, D., & Wen, G. (1999). Organic Matter Fractions Contributing to Soil Nitrogen Mineralization Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 63(2), 410-415.

- Demuner-Molina, G., Cadena-Zapata, M., Campos-Magaña, S. G., Zermeño-González, A., & Sánchez-Pérez, F. de J. (2014). Efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y desarrollo radicular. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 123-130.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3), 201-214.
- Dexter, A. R., & Bird, N. R. A. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57(4), 203-212.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 35, 1-21.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., Etchevers-Barra, J. D., Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.
- FAOSTAT. (s. f.). Recuperado 28 de septiembre de 2022, de <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Flores Delgadillo, L. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Forsythe, W. (1985). Manual de laboratorio física de Suelos. San José, Costa Rica: IICA.
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics Academic Press. San Diego, CA.
- Galantini, J. A., Iglesias, J. O., Maneiro, C., Santiago, L., & Kleine, C. (2006). Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones

- orgánicas y el espacio poroso del suelo. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 15-30.
- Gamarra Lezcano, CC; Díaz Lezcano, MI; Vera de Ortiz, M; Galeano, M del P; Cabrera Cardús, AJN. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales* 9(46):4-26.
- García R, D. Y., Cárdenas H, J. F., Parra, A. S., García R, D. Y., Cárdenas H, J. F., & Parra, A. S. (2018). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades físico-químicas y microbiológicas en un Inceptisol. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 16-25.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Doran, J. W., Pankhurst, C. E., & Dwyer, L. M. (1997). Chapter 4 Biological attributes of soil quality. En E. G. Gregorich & M. R. Carter (Eds.), *Developments in Soil Science*, 25, 81-113.
- Hartmann, P., Zink, A., Fleige, H., & Horn, R. (2012). Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of Arable Luvisols in Northwest Germany. *Soil and Tillage Research*, 124, 211-218.
- Hu, W., Tabley, F., Beare, M., Tregurtha, C., Gillespie, R., Qiu, W., & Gosden, P. (2018). Short-Term Dynamics of Soil Physical Properties as Affected by Compaction and Tillage in a Silt Loam Soil. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 180115.
- Irkiso, A. (2014). Effects of Liming Acidic Soils on Improving Soil Properties and Yield of Haricot Bean. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 5, 248.
- Islam, M. R., Jahan, R., Uddin, S., Harine, I. J., Hoque, M. A., Hassan, S., Hassan, M. M., & Hossain, M. A. (2021). Lime and Organic Manure Amendment Enhances Crop

- Productivity of Wheat–Mungbean–T. Aman Cropping Pattern in Acidic Piedmont Soils. *Agronomy*, 11(8), Art. 8.
- Jamioy Orozco, D. D., Menjivar Flores, J. C., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307.
- Jiménez, J., Puentes, H., & Leiva, F. R. (1992). Efectos de tratamientos de labranza sobre la resistencia a la penetración de un Andisol. *Agronomía Colombiana*, 9(1), Art. 1.
- Kamprath, E. J. (1970). Exchangeable Aluminum As a Criterion for Liming Leached Mineral Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34(2), 252-254.
- Kamprath, E. J. (1984). Crop Response to Lime on Soils in the Tropics. En *Soil Acidity and Liming* (pp. 349-368). John Wiley & Sons, Ltd.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Kim, T.-H., Jung, W.-J., Lee, B.-R., Yoneyama, T., Kim, H.-Y., & Kim, K.-Y. (2003). P effects on N uptake and remobilization during regrowth of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Environmental and Experimental Botany*, 50(3), 233-242.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B., & Glaser, B. (2012). Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(5), 698-707.

- Liu, Z., Cao, S., Sun, Z., Wang, H., Qu, S., Lei, N., He, J., & Dong, Q. (2021). Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports*, 11(1), Art. 1.
- Martinez, D., Landini, A., Soza, E., Heredia, O. & Sainato, C. (2010). Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo: densidad aparente, humedad, resistencia a la penetración, y modelos asociados. *Agro-Ciencia, Rev. Chil. Cs. Agropec*, 27(1): 5-14.
- Martínez, E., Fuentes, J.-P., Silva, P., Valle, S., & Acevedo, E. (2008). Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 232-244.
- Martínez, L. J., & Zinck, J. A. (2004). Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil and Tillage Research*, 75(1), 3-18.
- Matus, F. J., & Maire G., C. R. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126.
- Mijangos, I., Pérez, R., Albizu, I., & Garbisu, C. (2006). Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(1), 100-106.
- Miller, B. J. (1983). Chapter 8 Ultisols. En L. P. Wilding, N. E. Smeck, & G. F. Hall (Eds.), *Developments in Soil Science* ,11, 283-323.



- Miretti, M. C., Pilatti, M., Lavado, R. S., & Del Carmen Imhoff, S. (2012). Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del suelo*, 30(1), 67-73.
- Molina, E., & Rojas, A. (2005). Efecto del encalado en el cultivo de naranja valencia en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 29(3), 81-95.
- Molina Rojas, E. A. (1998). *Encalado para la corrección de la acidez del suelo* / (1a. ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo: *Centro de Investigaciones Agronómicas*.
- Montanari, R., De Passos e Carvalho, M., Andreotti, M., Dalchiavon, F. C., Lovera, L. H. & De Oliverira Honorato, M. A. (2010). Aspectos da produtividade do Feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(6), 1811-1822.
- Montanari, R., Lima, E., Lovera, L., Godoy, L., Henrique, A., & Dalchiavon, F. (2013). Correlación de la productividad de un forraje con las propiedades físicas de un Ultisol en Aquidauana. *Revista Ceres*, 60, 102-110.
- Nunes, M. R., Denardin, J. E., Pauletto, E. A., Faganello, A., & Pinto, L. F. S. (2015). Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. *Geoderma*, 259, 149-155.
- Ohep, C., Marcano, F., & Rangel, L. (1994). Efecco de la labranza sobre algunas características físicas del suelo y la producción del maíz en el Yaracuy. *Bioagro*, 6(3), 77-96.

- Olego, M. Á., Quiroga, M. J., Mendaña-Cuervo, C., Cara-Jiménez, J., López, R., & Garzón-Jimeno, E. (2021). Long-Term Effects of Calcium-Based Liming Materials on Soil Fertility Sustainability and Rye Production as Soil Quality Indicators on a Typic Palexerult. *Processes*, 9(7), Art. 7.
- Osorno, H., & Osorno, L. (2010). Artículo de revisión determinación de los requerimientos de cal how to determine lime requirements for cultivated soils. *Suelos Ecuatoriales*, 41, 29-35.
- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., González-Cossío, F. V., Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., & González-Cossío, F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40(1), 27-38.
- Pandit, N. R., Schmidt, H. P., Mulder, J., Hale, S. E., Husson, O., & Cornelissen, G. (2020). Nutrient effect of various composting methods with and without biochar on soil fertility and maize growth. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(2), 250-265.
- Piedra Quesada, V. (2017). División territorial administrativa de la República de Costa. San José: Imprenta Nacional.
- Pinzón, B., González, J., & Montenegro, R. (1980). Efecto del encalado en suelos ácidos de Panamá. II. Cambios en las características químicas del suelo. *Ciencia Agropecuaria*, (3), 67-75.
- Ramírez, S. M., Carvajal, L. J., Monge, I. B., & Flores, J. C. J. (2022). *Indicadores Macroeconómicos 2018-2022 (Actualización julio 2022)*.

- Rheinheimer, D. S., Tiecher, T., Gonzatto, R., Zafar, M., & Brunetto, G. (2018). Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. *Geoderma*, 313, 7-16.
- Rivera Vázquez, J.M; Carfagno, P & Eliza, M.J. (2017). Efecto de la inclusión de cultivos de cobertura sobre la porosidad de un suelo Hapludoll del oeste de la provincia de Buenos Aires. *Fac. Agronomía y Cs Agroalim. UM*, 8, 31-45.
- Rodríguez, M. 1998. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento de maíz en los llanos altos del estado Monagas, *Agron. Trop.* 48 (2): 157-174.
- Rosegrant, M. W., Fernández, M., Sinha, A., Alder, J., Ahammad, H., Fraiture, C. de, Eickhout, B., Fonseca, J., Huang, J., Koyama, O., Omezzine, A. M., Pingali, P. L., Ramírez, R., Ringler, C., Robinson, S., Thornton, P. K., Vuuren, D. van, & Yanashapiro, H. (2009). *Looking into the future for agriculture and AKST*.  
<https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/37336>
- Rossetto, R., Spironello, A., Cantarella, H., & Quaggio, J. A. (2004). Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação coma adubação potássica. *Bragantia*, 63, 105-119.
- Santana, L., Masaguer, A. & Baldoquin, A. (2014). Efecto de sistemas de labranza en luvisoles dedicados a la producción de pastos. Madrid: *Universidad Politécnica de Madrid, España*.
- Schulz, H., Dunst, G., & Glaser, B. (2013). Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 817-827.

- Schwertmann, U., & Herbillon, A. J. (1992). Some Aspects of Fertility Associated with the Mineralogy of Highly Weathered Tropical Soils. *Myths and Science of Soils of the Tropics* 47-59.
- Sepúlveda, C., Ríos, N., Tobar, D., Casasola, F., Ibrahim, M., & Sepúlveda, C. (2009). Implementación de sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático en fincas ganaderas (No. CATIE ST IT-377). *CATIE*, Turrialba. Costa Rica.
- Solano, J. & Villalobos, R. (2012). Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica. San José: *Instituto Meteorológico Nacional*.
- Southard, R. J., & Southard, S. B. (1987). Sand-sized Kaolinized Feldspar Pseudomorphs in a California Humult. *Soil Science Society of America Journal*, 51(6), 1666-1672.
- Stenberg, M., Stenberg, B., & Rydberg, T. (2000). Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. *Applied Soil Ecology*, 14(2), 135-145.
- Studdert, G. A., Echeverría, H. E., & Casanovas, E. M. (1997). Crop-Pasture Rotation for Sustaining the Quality and Productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1466-1472.
- Swift, R. S. (2001). SEQUESTRATION OF CARBON BY SOIL. *Soil Science*, 166(11), 858-871.
- Szott, L., Ibrahim, M., & Beer, J. (2000). The hamburger connection hangover: cattle pasture land degradation and alternative land use in Central America. *Serie Técnica. Informe Técnico No. 313. CATIE*. Turrialba, Costa Rica, 71.

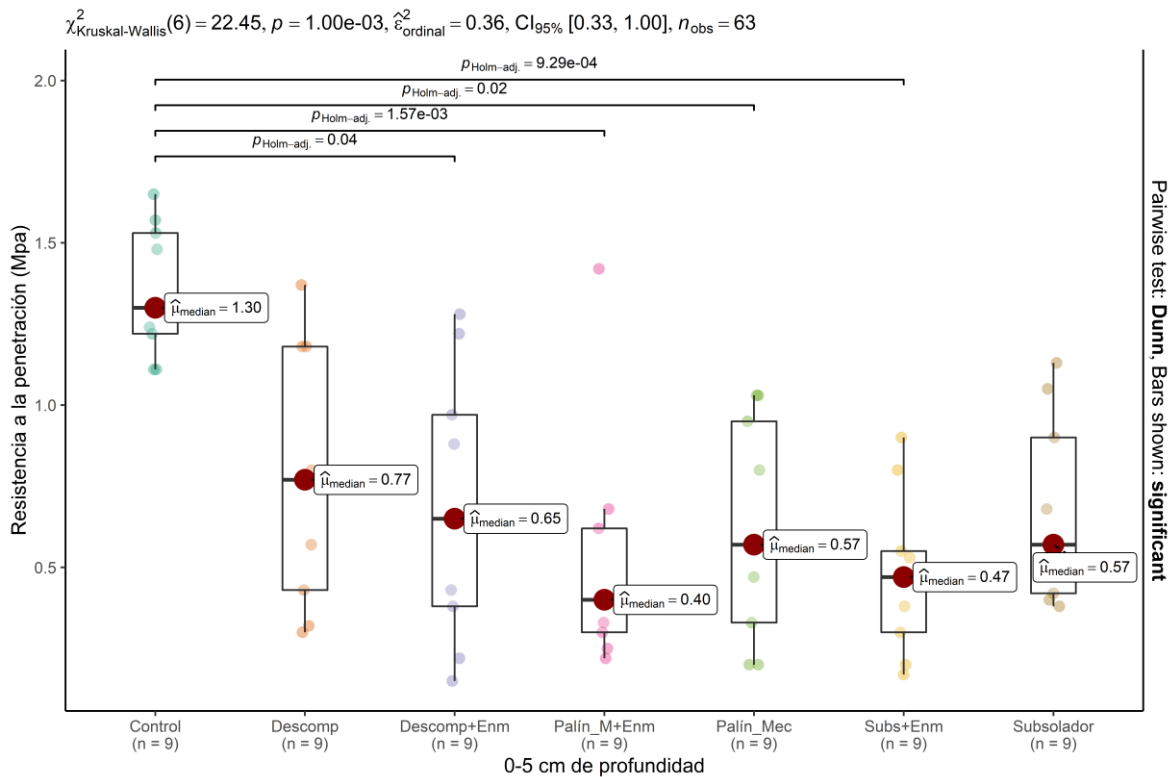
- Valerio, J. M., & Molina, E. (2012). Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento del arroz en un ultisol de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 89-96.
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, & Yates, S. R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Vogel, H.-J., & Roth, K. (2001). Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. *Advances in Water Resources*, 24(3), 233-242.
- Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., & Šimunek, J. (2001). Calibration of a Two-Dimensional Root Water Uptake Model. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1027-1037.
- Wang, Q., Lu, C., Li, H., He, J., Sarker, K. K., Rasaily, R. G., Liang, Z., Qiao, X., Li, H., & Mchugh, A. D. J. (2014). The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 137, 43-49.
- West, L. T., Beinroth, F. H., Sumner, M. E., & Kang, B. T. (1997). Ultisols: Characteristics and Impacts on Society. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, 63, 179-236.
- Wilcke, W., Kretschmar, S., Bundt, M., Saborío, G., & Zech, W. (2000). Depth distribution of aluminum and heavy metals in soils of Costa Rican coffee cultivation areas. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(5), 499-502.

Willekens, K., Vandecasteele, B., Buchan, D., & De Neve, S. (2014). Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology*, 82, 61-71.

Zhang, J., Bei, S., Li, B., Zhang, J., Christie, P., & Li, X. (2019). Organic fertilizer, but not heavy liming, enhances banana biomass, increases soil organic carbon and modifies soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, 136, 67-79.

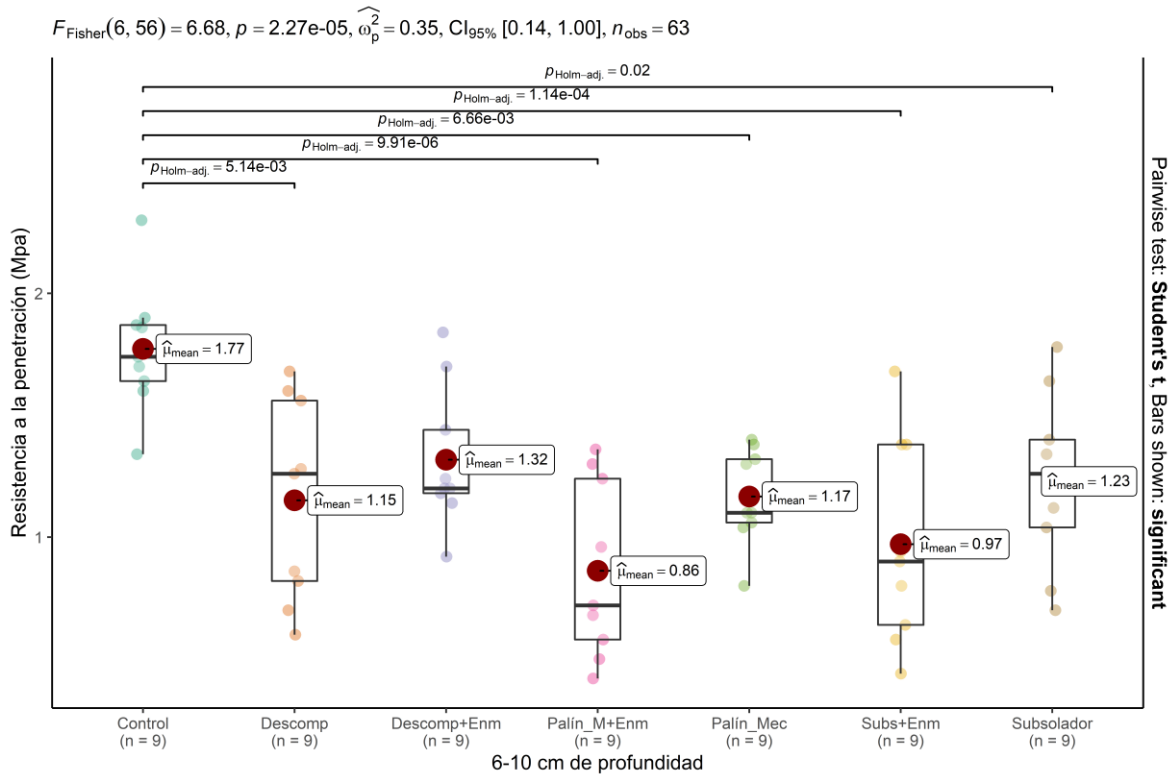
## ANEXOS

**Anexo 1.** Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 0-5 cm, líneas representan comparación por pares por el método Dunn.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Median: mediana; MPa: megapascuales

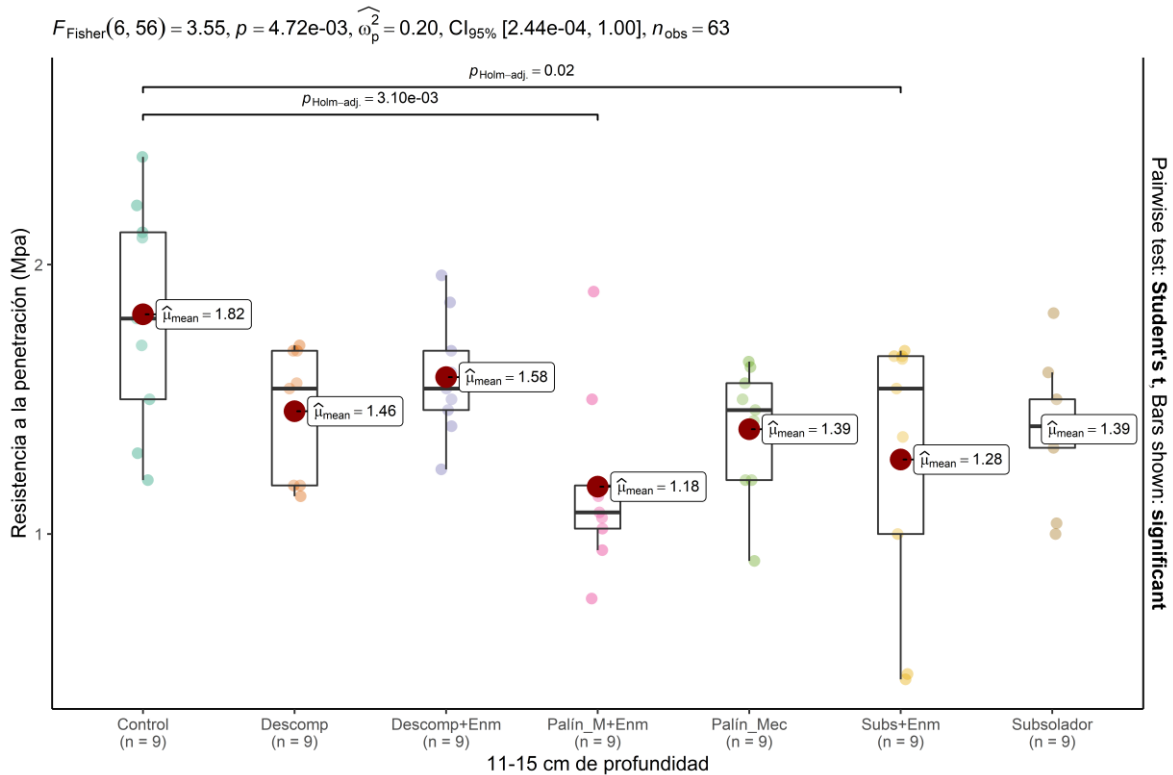
**Anexo 2.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 6-10cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascales

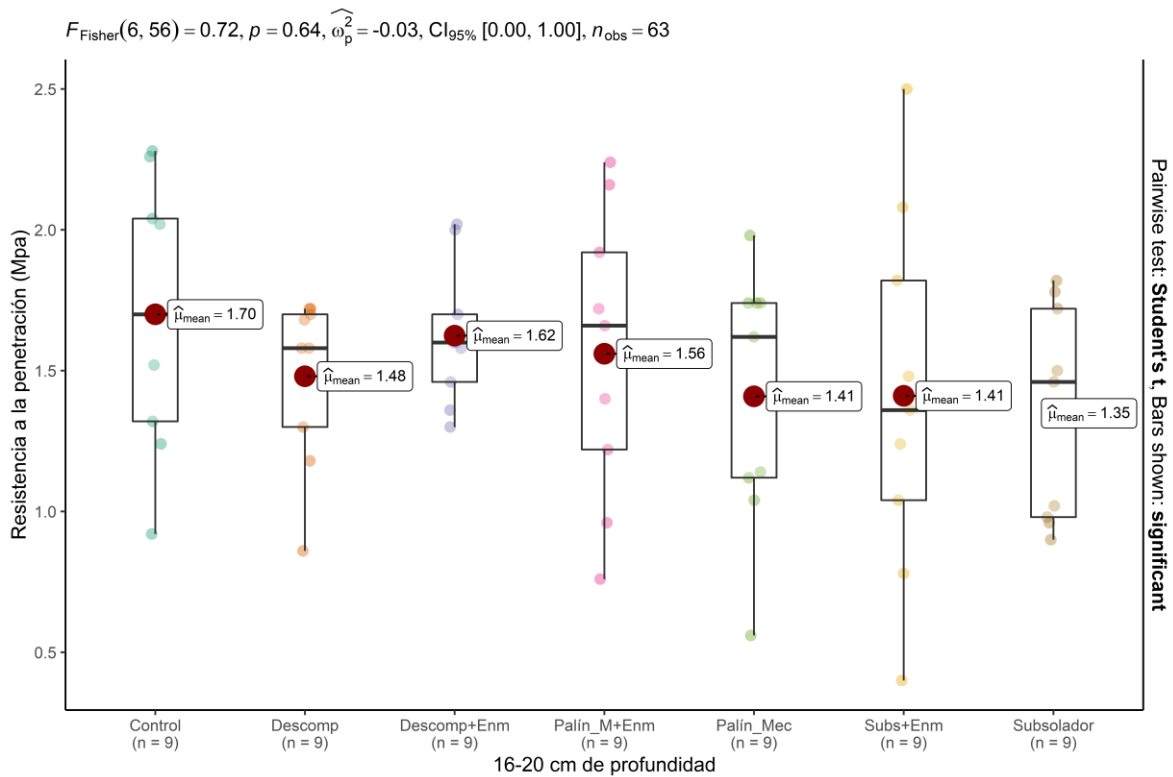


**Anexo 3.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 11-15 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



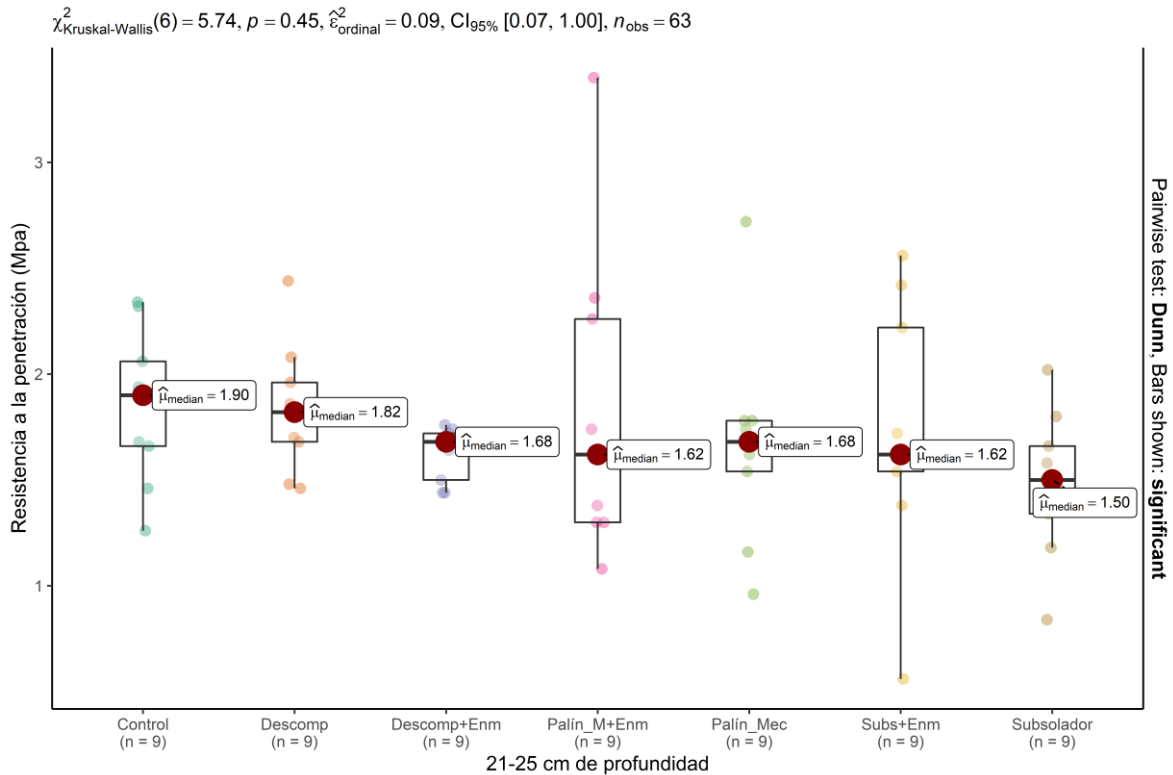
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 4.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 16-20 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



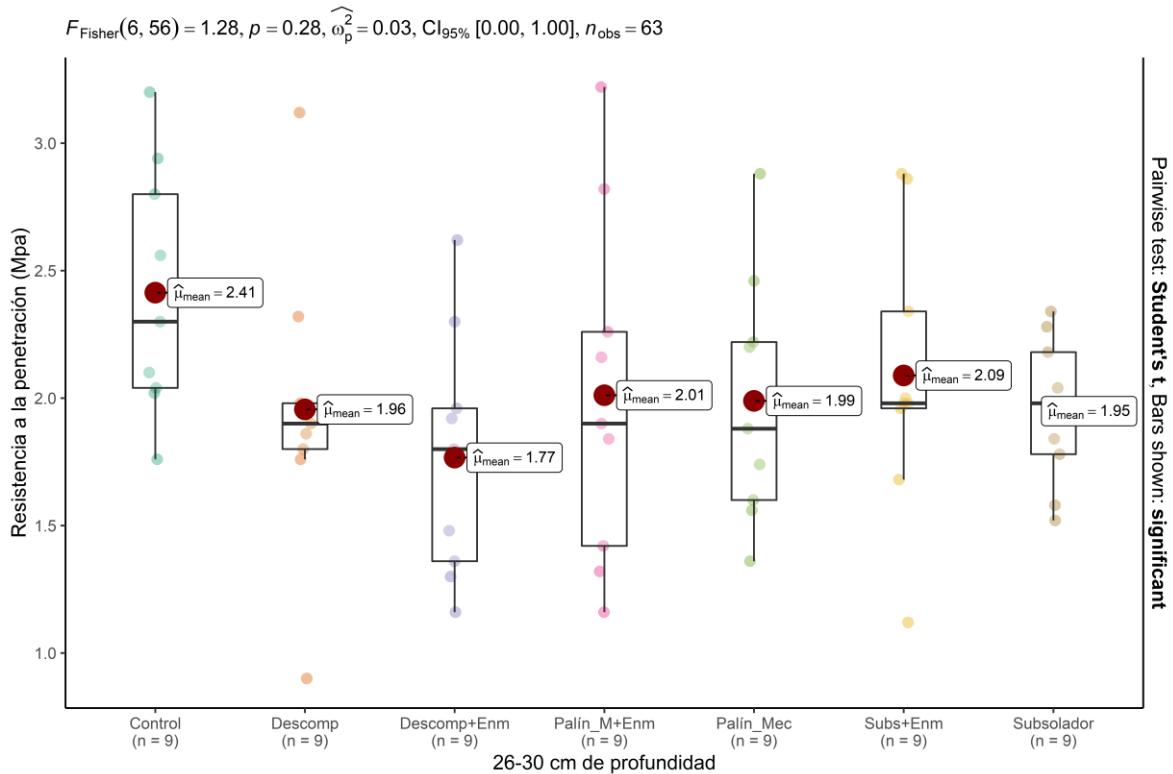
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascuales

**Anexo 5.** Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 21-25 cm, líneas representan comparación por pares por el método Dunn.



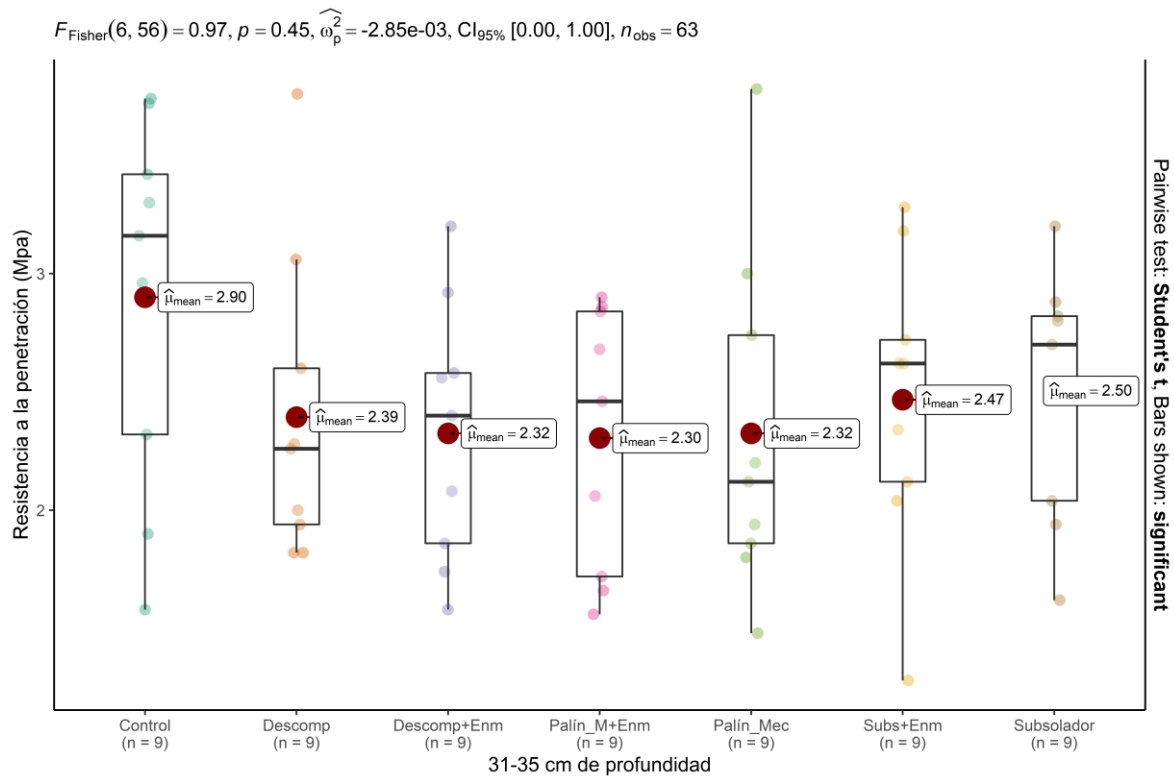
Subs: Subsolorador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Median: mediana; MPa: megapascuales

**Anexo 6.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 26-30 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



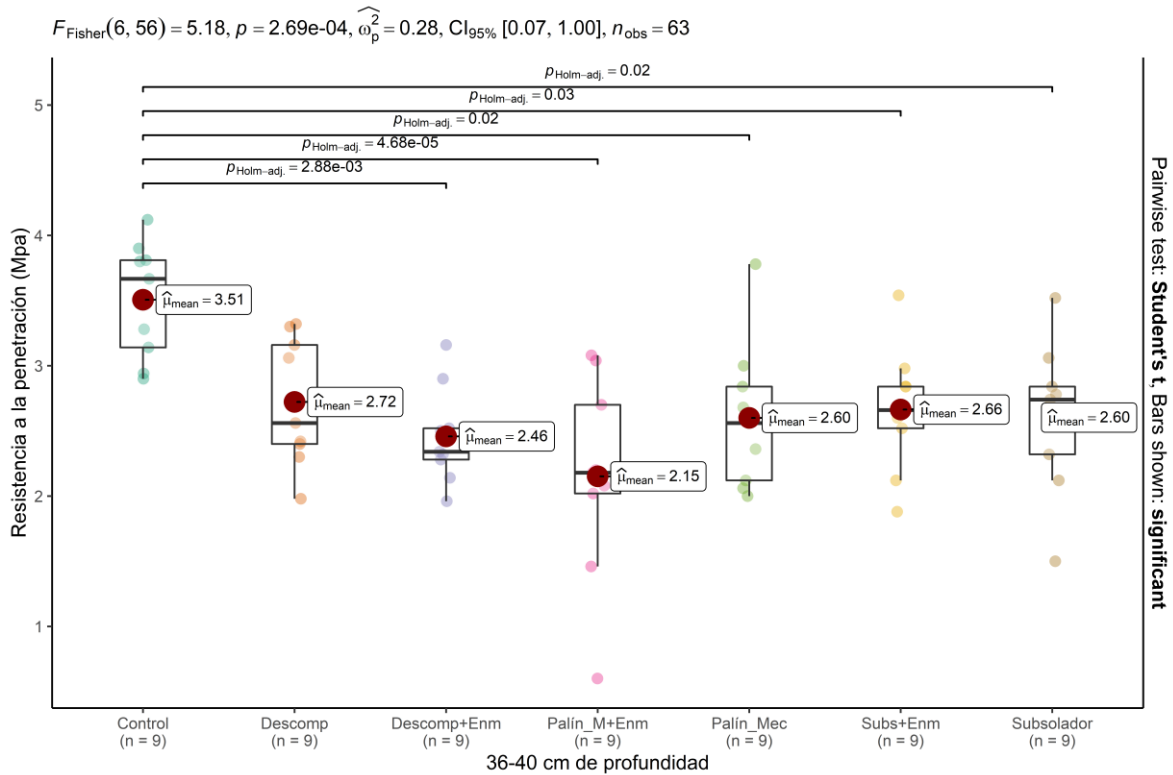
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 7.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 31-35 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



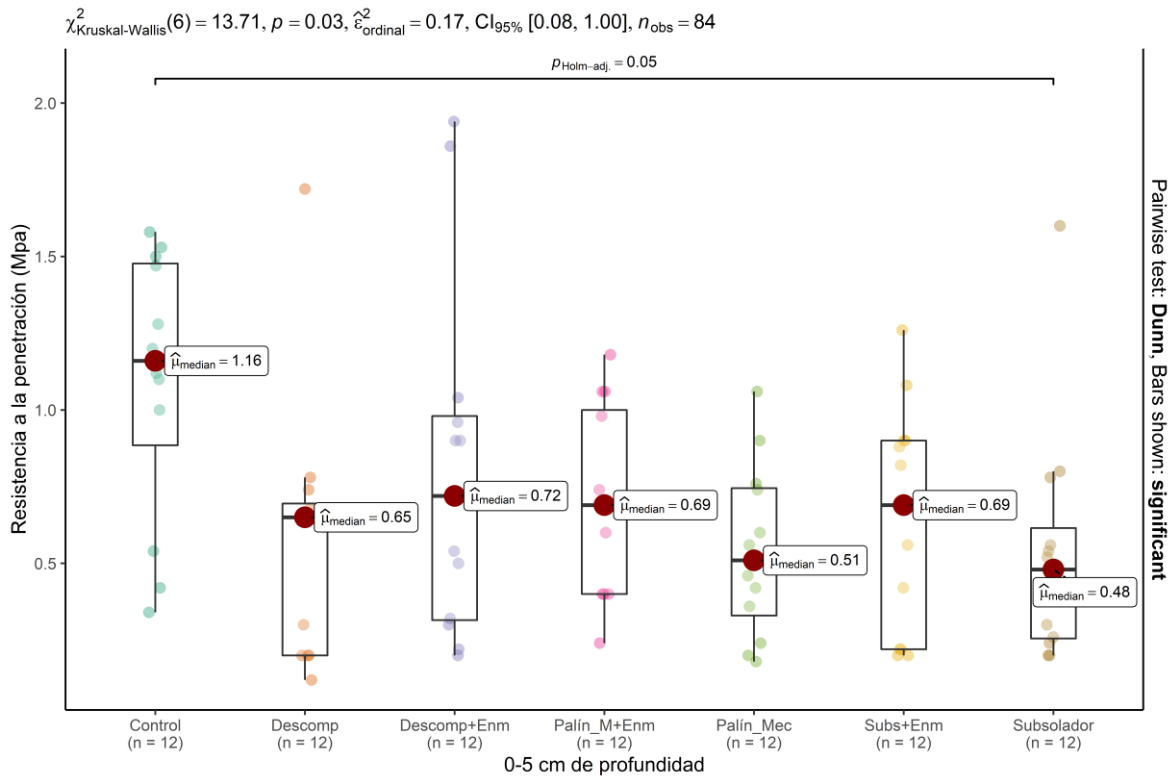
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 8.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 35-40 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



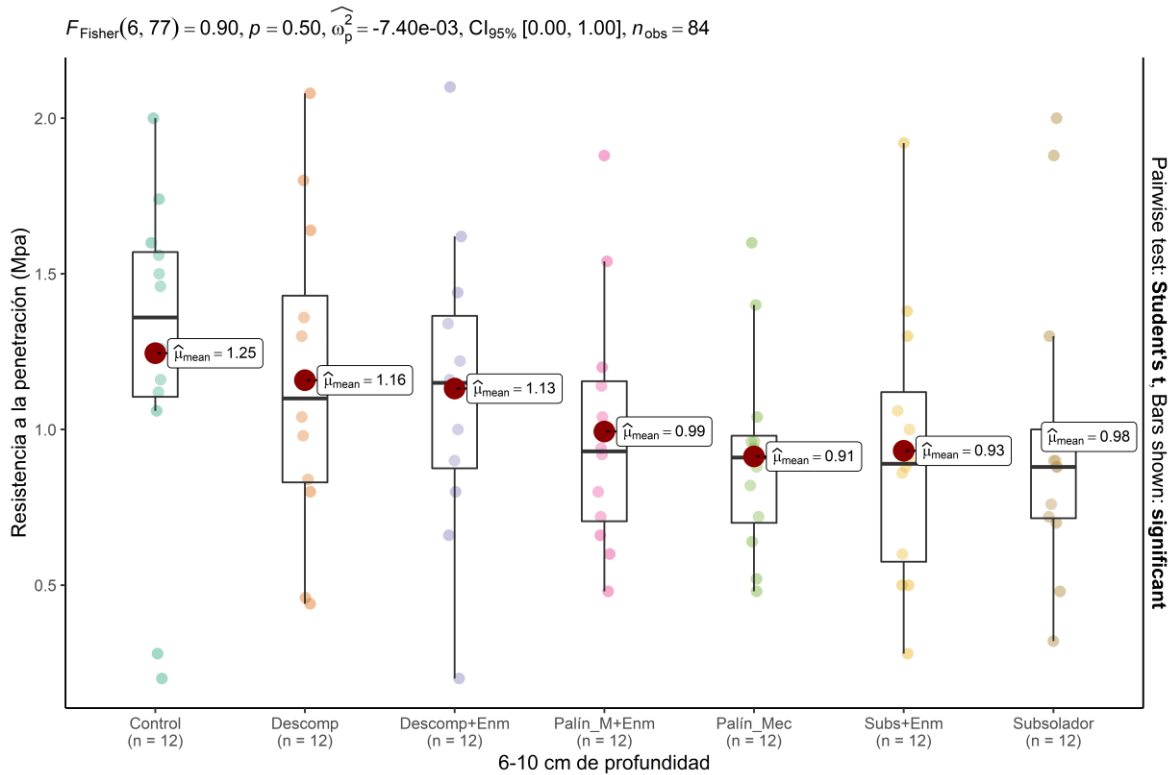
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 9.** Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 0-5 cm, líneas representan comparación por pares por el método Dunn.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Median: mediana; MPa: megapascuales

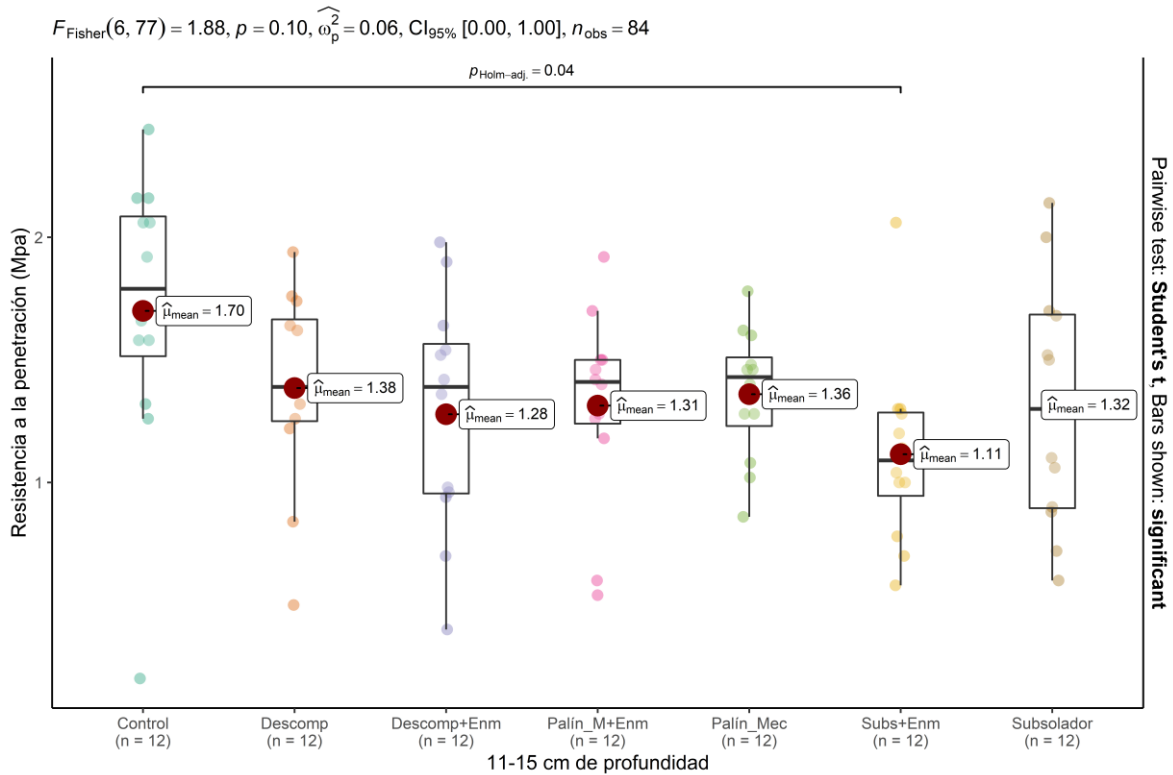
**Anexo 10.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 6-10 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la *t* de Student.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

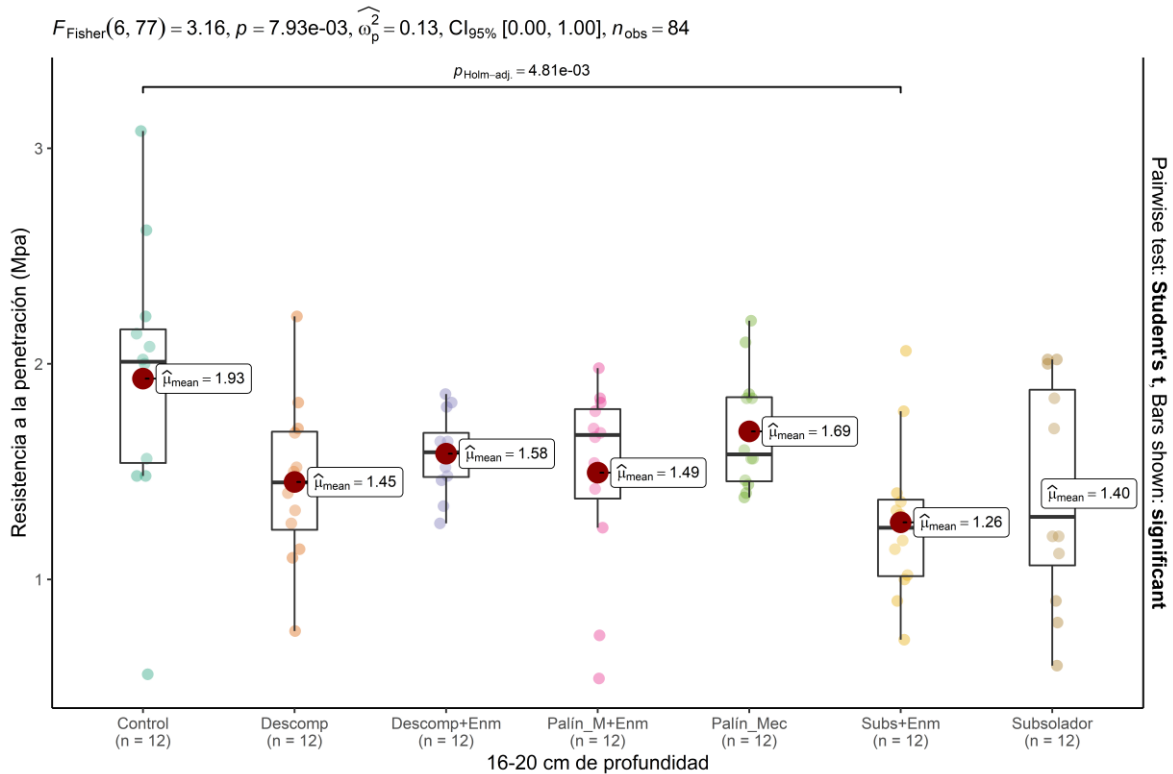


**Anexo 11.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 11-15 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



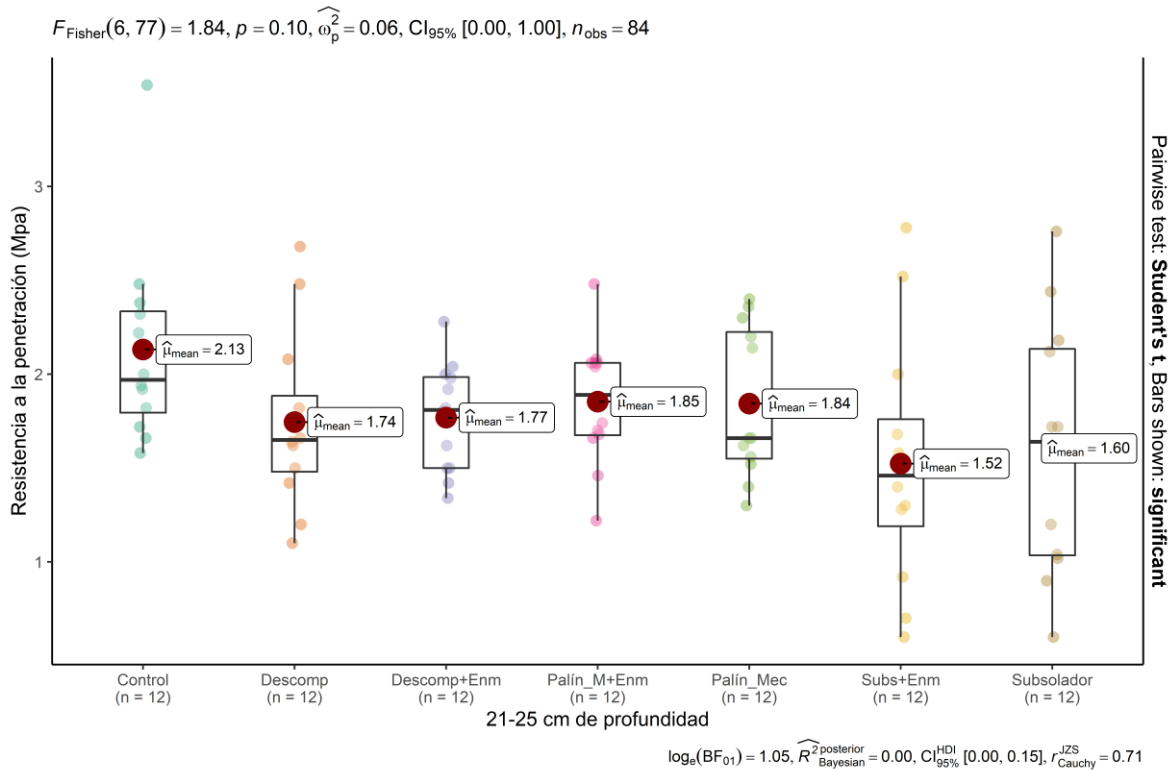
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 12.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 16-20 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



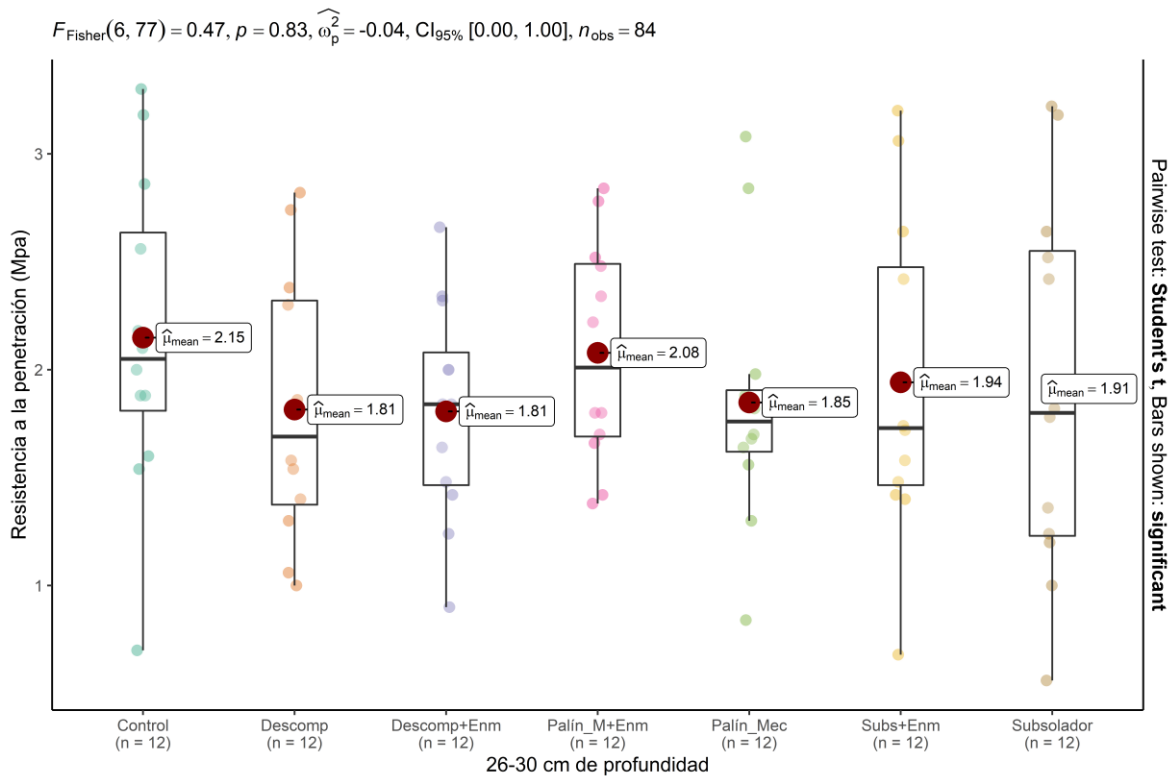
Subs: Subsolorador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascuales

**Anexo 13.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 21-25 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la  $t$  de Student.



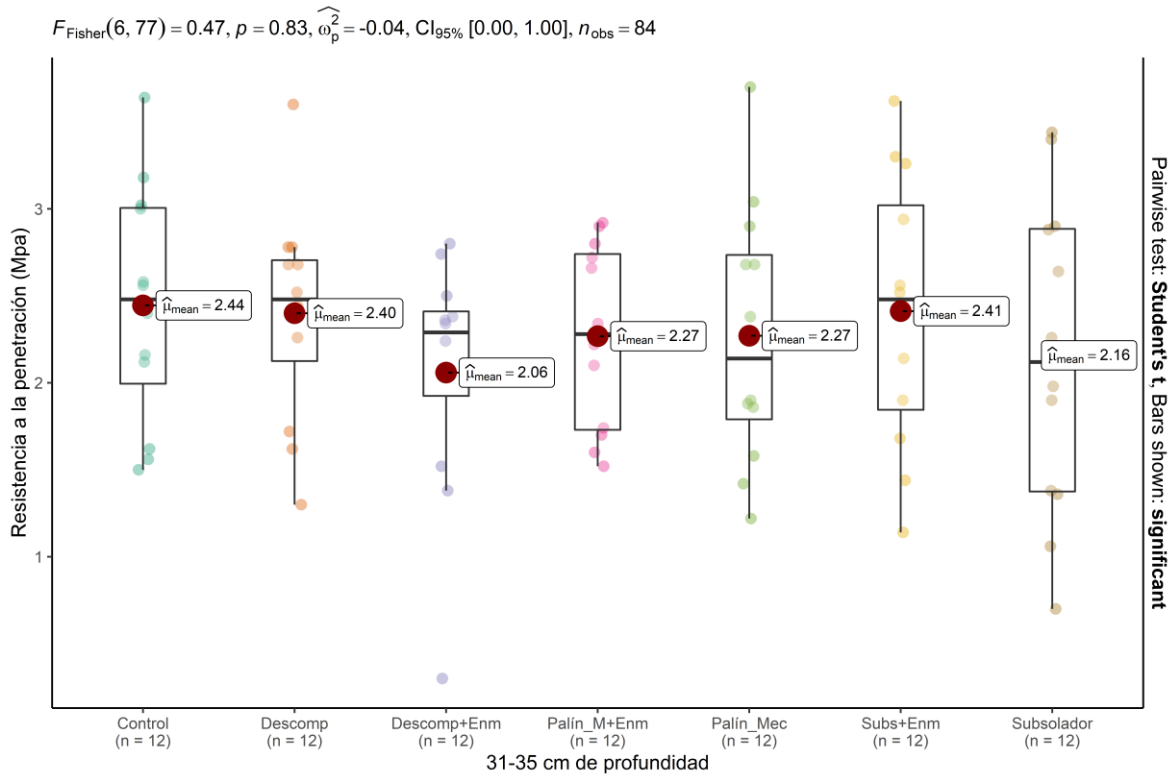
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 14.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 26-30 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



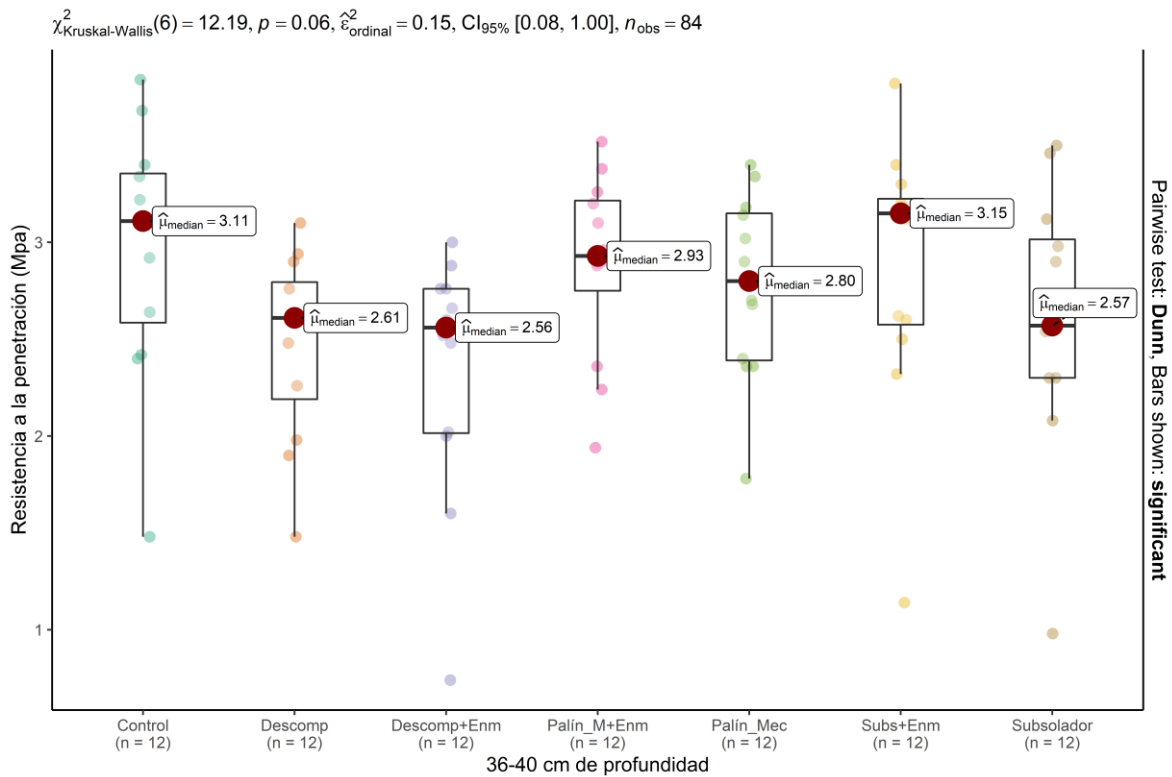
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 15.** Análisis de varianza sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 31-35 cm, líneas representan comparación por pares por medio de la t de Student.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
Mean: media; MPa: megapascales

**Anexo 16.** Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la resistencia a la penetración del suelo a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos a una profundidad de 36-40 cm, líneas representan comparación por pares por el método Dunn.



Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador;  
 Median: mediana; MPa: megapascales

**Capítulo 4. Evaluación de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) y su calidad nutricional en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.**

**RESUMEN**

A nivel mundial, los sistemas de producción de pasto para la alimentación ganadera representan alrededor del 26% de la superficie terrestre y se estima que aproximadamente el 70% de la superficie dedicada a la agricultura. El pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) utilizado como pasto de corte, bajo sistemas de secano se ha convertido en una alternativa de alimentación para el ganado y como una manera de asegurar la disponibilidad de alimento sobre todo en épocas donde la producción de pasto es limitada. El objetivo de este trabajo propone evaluar el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) y su calidad nutricional en San Mateo de Alajuela, Costa Rica. En este estudio se evaluó el efecto de la labranza y enmiendas de cal y compost sobre la producción de pasto. Las variables fueron evaluadas 78, 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Dichos tratamientos consistieron en Subsolador, Palín Mecánico, Descompactador, Subsolador+Enmienda, Palín Mecánico+Enmienda, Descompactador+Enmienda y un Tratamiento Control. Donde los tratamientos con enmienda fueron los que presentaron los valores más altos de cobertura y altura tanto a los 78 como a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Sin embargo, a los 78 días ninguno de los tratamientos difirió significativamente del Control en cuanto a la cobertura. Para el caso de la altura, todos los tratamientos con enmienda, mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en relación con los tratamientos sin enmienda y el Control, siendo el Palín Mecánico+Enmienda el que presentó el valor más alto (50,08 cm). Luego de 173 el Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda mostraron la mayor altura con 39,91 y 39,25 cm respectivamente. El caso de la cobertura en esta misma fecha los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda mostraron los mejores resultados con una mediana de 96 y 95 % respectivamente, siendo significativamente diferentes del Control ( $p < 0,05$ ). La producción de pacas por hectárea a los 78 días, todos los tratamientos con enmienda mostraron ser significativamente ( $p < 0,05$ ) superiores al Control, de los cuales el Subsolador+Enmienda presentó la mayor producción

(423,06±32,51 pacas/ha), obteniendo más del doble de producción que el Control (165±17,44 paca/ha) y casi 5 veces más la producción obtenida con el Palín Mecánico (84,81±10,24 pacas/ha). Luego de 173 días el Palín Mecánico+Enmienda obtuvo los mayores valores (268,97±26,57 pacas/ha) y el único tratamiento significativamente distinto ( $p<0,05$ ) al control. Para el caso de la proteína cruda y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca no se encontraron diferencias significativas ( $p>0,05$ ) entre tratamientos en ninguno de los periodos de evaluación. Los tratamientos de labranza en conjunto con la aplicación de cal y compost, incrementan significativamente la producción de pasto, alcanzando incluso a duplicar la producción, sin embargo, la calidad nutricional del pasto no se ve alterada por los tratamientos aplicados en este estudio, luego de 78 y 95 días de rebrote (78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos respectivamente).



## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los sistemas de producción de pasto para la alimentación ganadera representan alrededor del 26% de la superficie terrestre y se estima que aproximadamente el 70% de la superficie dedicada a la agricultura (Bol, 2010). Originario de Sudáfrica, el pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) es una gramínea introducida a Estados Unidos en el año de 1935 y traída a Costa Rica en los años 70's, siendo establecida en distintas zonas geográficas del país, pero de manera particular en la región Chorotega, donde se utiliza como pasto de corte, cuya henificación es comúnmente bajo sistemas de secano (Tecnológicos, 2019). Lo cual se ha convertido en una alternativa de alimentación para el ganado y como una manera de asegurar la disponibilidad de alimento sobre todo en épocas donde la producción de pasto es limitada (Kendall et al., 2009). En este contexto, la conservación del pasto es una estrategia alimenticia eficaz que permite diseñar los arreglos espaciales y productivos en la finca, generando competitividad en los sistemas agropecuarios (Angulo-Arroyave & Rosero-Noguera, 2018).

Por su parte, los rendimientos del pasto dependen principalmente de la producción de biomasa, que es probablemente la más importante característica de todo cultivo forrajero, pues de la velocidad de producción de biomasa depende su calidad nutricional y su tasa productiva (Capstaff & Miller, 2018). La edad de rebrote del pasto transvala, determina la calidad del forraje y por lo general, las gramíneas forrajeras son capaces de mantener las características nutricionales de manera aceptable (contenido de proteína, fibra, energía y digestibilidad) incluso, hasta los 45 días después del rebrote, a partir de este periodo la calidad del pasto se reduce significativamente (Morales, 2006). La concentración de proteínas, carbohidratos y lípidos del forraje determinan su estado nutricional y su capacidad para ser digerido por el rumiante, que, junto con las vitaminas y minerales, confieren la cantidad de energía que puede obtener el animal (Capstaff & Miller, 2018).

Por otro lado, tránsito de animales y maquinaria pesada, son factores de suma importancia que contribuyen al deterioro del pasto, a la variabilidad y heterogeneidad de las propiedades químicas, físicas y biológicas que caracterizan los suelos (Montanari et al., 2013). Como consecuencia de esta actividad en las áreas de producción de pasto, son frecuentes los deterioros de las propiedades edáficas, lo cual, guarda una estrecha relación con la

reducción de la producción de biomasa, cobertura vegetal y valor nutricional de los pastos (Demuner-Molina et al., 2014). Por lo tanto, la limitación de crecimiento de las plantas se asocia directamente al deficiente desarrollo radicular, que, a su vez, con frecuencia se da por un inadecuado manejo del suelo que causa compactación (Roque García, 2015).

Sin embargo, los sistemas agrícolas, donde los procesos de remoción de suelo son limitados, propicia la estructuración del suelo, con lo que aumenta la humedad del mismo y facilita la penetración radicular, por lo tanto, los suelos no removidos presentaran menor resistencia a la penetración (Baker et al., 2008), Por lo tanto, la gestión del suelo en los sistemas de producción de pastos, es indispensable para lograr altos índices de productividad, que equilibren la producción y la sostenibilidad de los sistemas pecuarios (Serrano et al., 2018). En ese sentido, el objetivo de este trabajo propone evaluar el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) y su calidad nutricional en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.

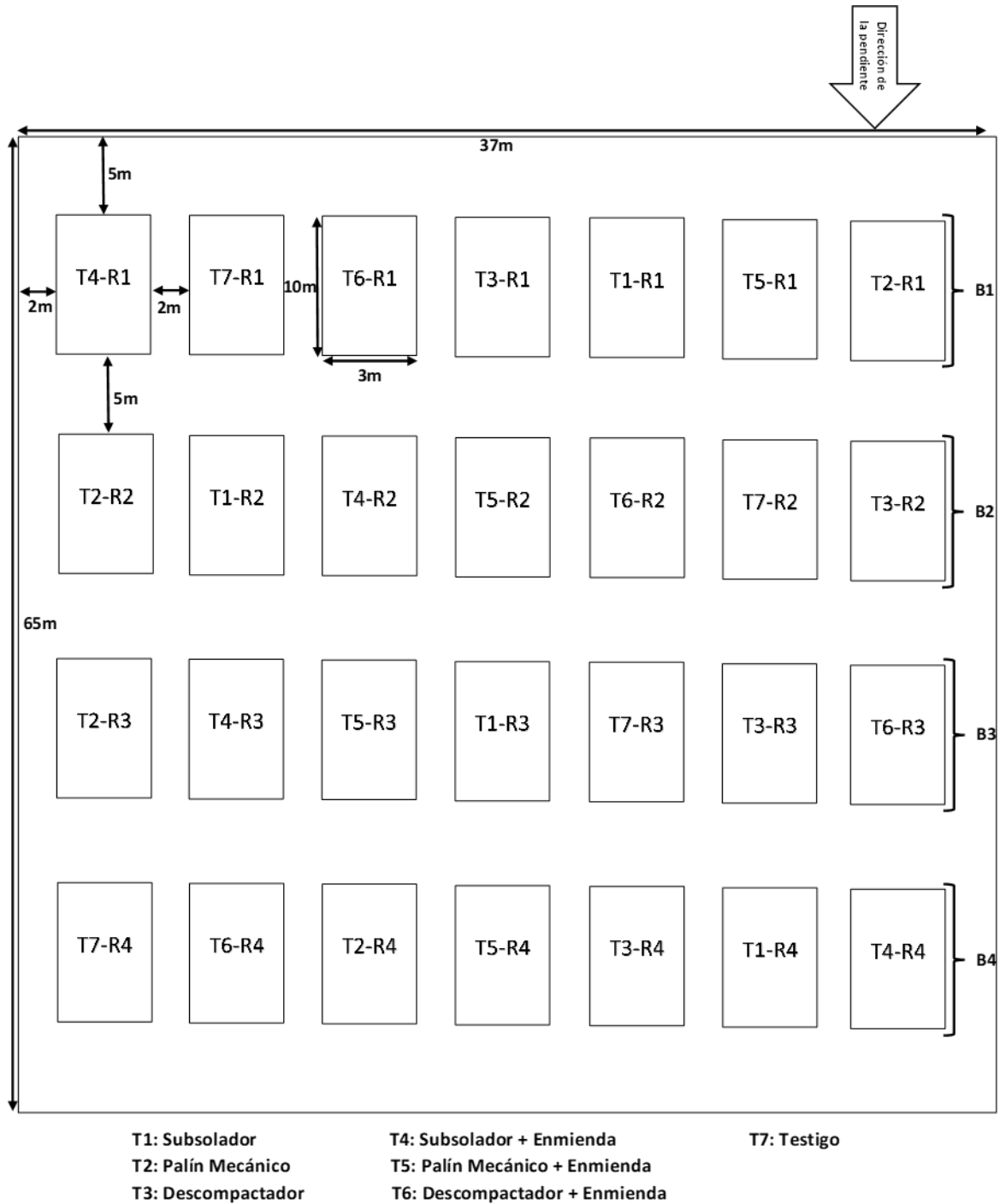
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una finca dedicada a la producción ganadera, ubicada en Labrador de San Mateo de Alajuela (9°56'01"N 84°37'59"O), perteneciente a la región del Pacífico Central de Costa Rica, en la cuenca del Río Jesús María, con una altitud de 254 msnm (Piedra Quesada, 2017). El sitio se caracteriza por un régimen de humedad Ústico, con un periodo seco con duración aproximada de 4 a 5 meses y otro lluvioso que dura aproximadamente 8 meses, con una precipitación media anual de 2637 mm. La temperatura media anual es de 26°C (Solano & Villalobos, 2012). El suelo en el sitio de estudio es un Ustic Palehumults, según su clasificación taxonómica del sistema USDA, los cuales son antiguos, meteorizados, con contenidos de arcilla altos, ricos en materia orgánica y de régimen de humedad Ústico, que se caracteriza por una época seca marcada mayor a 3 meses (Camacho, 2015).

### Diseño del Experimento

El experimento se estableció en un área de 2405 m<sup>2</sup>, donde se ubicaron 28 sub-parcelas o unidades experimentales con dimensiones de 3 x 10 m (30 m<sup>2</sup>). Con un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos por bloque más un control, repetido en 4 bloques. Los tratamientos consistieron en labranza mecanizada de suelo utilizando tres implementos: Palín Mecánico, Descompactador y Subsolador, más un Control. Además, se utilizó una enmienda de tipo orgánico o compostado a base de gallinaza (Cuadro 1), en combinación con CaCO<sub>3</sub> (Cuadro 2). En total se aplicaron seis tratamientos más un control sin labranza y sin enmiendas (Cuadro 3).



**Figura 11.** Croquis del experimento.

**Cuadro 1.** Características químicas y físicas del compost.

% masa								
C	MO	Humedad	N	P	Ca	Mg	K	S
16,40	23,45	26	2,53	2,17	3,66	0,69	2,48	0,52
mg/kg						Relación	H <sub>2</sub> O	mS/cm
Fe	Cu	Zn	Mn	B	C/N	pH	CE	
36391	144	568	1388	37	6,5	7,8	20,8	

**Cuadro 2.** Características químicas y granulométricas de la cal.

PUREZA QUÍMICA							% PRNT
% Humedad	% masa/masa					% EQ	
	Ca	Mg	S	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>		
0,2%	39,3	0,1		98,3	0,4	98,8	
GRANULOMETRÍA							98,7
# de malla	10	20	40	60	> 60	% EG	
% de material	0,0	0,0	0,0	0,2	99,8		
% de efectividad	0,0	0,0	0,0	0,1	99,8	99,9	

EQ: Equivalente químico; EG: Efectividad granulométrica; PRNT; Poder relativo de neutralización total

**Cuadro 3.** Tratamientos de labranza mecanizada y enmiendas.

Tratamientos	Profundidad de trabajo (cm)	Separación entre órganos de labor (cm)	Compost (ton/ha)	CaCO <sub>3</sub> (ton/ha)
Subsolador	40	65		
Palín Mecánico	15	25		
Descompactador	20	39		
Subsolador+Enmienda	40	65	7,33	2
Palín Mecánico+Enmienda	15	25	7,33	2
Descompactador+Enmienda	20	39	7,33	2
Control				

## Muestreos

Los periodos de muestreo se ajustaron a las 2 primeras fechas de corte del pasto establecidas por el productor, a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Se tomaron 4 muestras al azar por cada uno de los tratamientos a una profundidad, estas muestras fueron colocadas en bolsas de papel perforadas y posteriormente llevadas al laboratorio para su debido análisis.

## VARIABLES EVALUADAS

*Altura:* Con ayuda de una cinta métrica se midió la altura (cm) del pasto, considerando como referencia la superficie del suelo hasta el ápice de los tallos. Para el caso de la altura se tomaron 12 puntos al azar por tratamiento.

*Cobertura:* Utilizando el método del marco cuadrado, el cual cuenta con un área de 1 m<sup>2</sup>, se tomaron 4 puntos de muestreo por tratamiento de manera aleatoria, en estos puntos se determinó la cobertura (%), usando una aplicación android de uso libre como Canopeo de Oklahoma State University ([www.canopeoapp.com](http://www.canopeoapp.com)), diseñadas para medir cobertura de suelos de pasturas.

*Pacas por hectárea:* En un área de 1 m<sup>2</sup> la hierba fue cortada a ras del suelo (3 a 4 cm de la superficie del suelo) y colocada en bolsas de papel perforadas y luego llevadas al laboratorio donde fueron pesadas (materia fresca). Posteriormente, con el fin de deshidratar las muestras se colocaron en una estufa a 60 °C por 48 horas, luego de este tiempo las muestras fueron nuevamente pesadas (materia seca). Por último, se aplicó la siguiente ecuación para determinar el porcentaje de MS con respecto a la materia fresca:

$$\%MS = \frac{Ps}{Pf} \times 100$$

Donde:

MS: Materia seca (g)

Ps: Peso seco (g)

Pf: Peso Fresco (g)

Finalmente, con el dato de materia seca por metro cuadrado (Kg), se realizó el cálculo de materia seca por hectárea, multiplicándolo por 10000 y luego dividiendo el resultado entre 18 (que representa el peso promedio de una paca producida en la finca del productor). Este cálculo permite obtener el valor potencial de producción de pacas de heno sin considerar la pérdida de peso (humedad) en el proceso.

*Proteína Cruda (PC) y Digestibilidad In-Vitro de la Materia Seca (DIVMS):* Estos análisis se realizaron en laboratorio de bromatología del Centro de Investigaciones en Nutrición Animal (CINA) siguiendo el método descrito por (AOAC,1991)

### **Análisis de datos**

Los datos se analizaron con el software estadístico R (RStudio) versión 1.3.1073 (© 2009-2020 RStudio, PBC). Se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuales, homogeneidad de la varianza y presencia de observaciones influyentes (valores extremos). De cumplir con los supuestos, posteriormente se realizó un análisis de varianza de dos vías (ANDEVA) con la función `aov()`, para determinar si existía interacción entre tratamientos y fechas de muestreo. Y con la función `ggbetweenstats()` del paquete “`ggstatsplot`”, para el caso de la cobertura. En caso de encontrar diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey) con la función `tukeyHSD()`, por tratamientos entre fechas de muestreo. En caso de que no se cumplieran los supuestos del análisis de varianza, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas y una comparación por pares con DUNN.

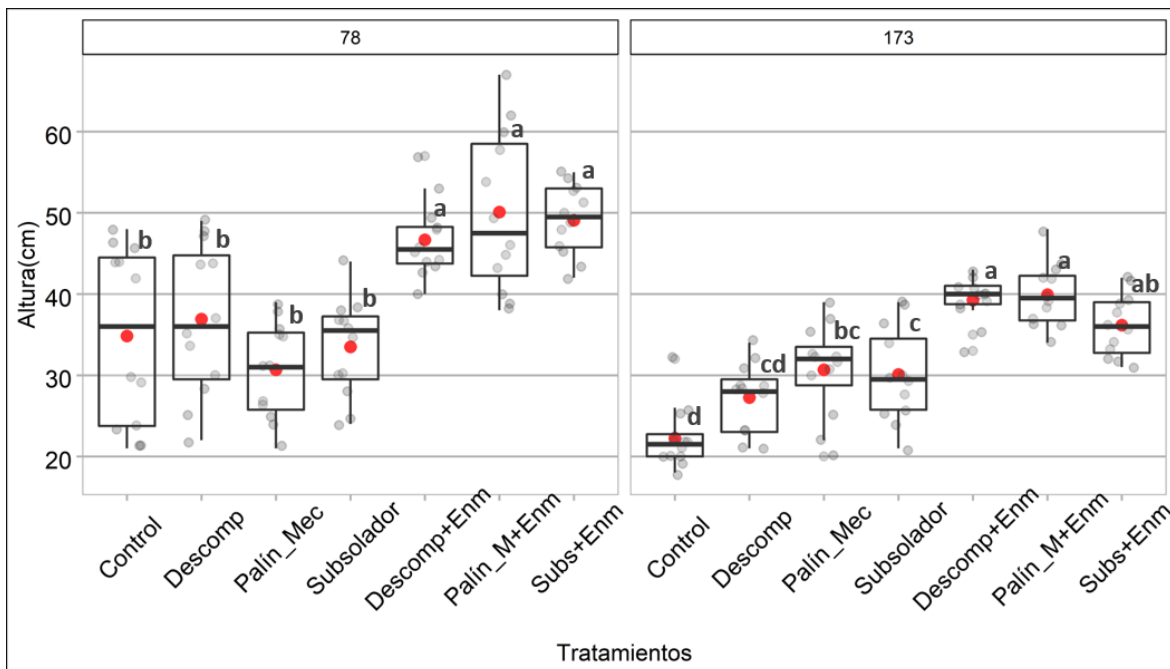
## RESULTADOS

### **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) y su calidad nutricional.**

#### *Altura*

Es notorio el efecto que tuvieron los tratamientos sobre este parámetro, donde sobresalen los tratamientos con enmienda, quienes fueron los que presentaron los valores más altos tanto a los 78 como a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Mostrando todos ellos, diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en relación con los tratamientos sin enmienda y el Control, mas no, entre ellos a los 78 días, siendo el Palín Mecánico+Enmienda el que presentó el valor más alto (50,08 cm). Este mismo tratamiento, pero sin enmienda presento la menor altura (30,66 cm), sin embargo, no difirió estadísticamente ( $p > 0,05$ ) del Control que presentó una altura de 34,83 cm. Luego de 173 días todos los tratamientos redujeron su altura con respecto a los valores observados a los 78 días. Los tratamientos con enmienda mostraron un patrón similar, el Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda mostraron la mayor altura con 39,91 y 39,25 cm respectivamente. En este punto todos los tratamientos de solo labranza lograron superar la altura del Control que presentó la menor altura, mostrando diferencia estadística con respecto a este, los tratamientos de Palín Mecánico y Subsolador.





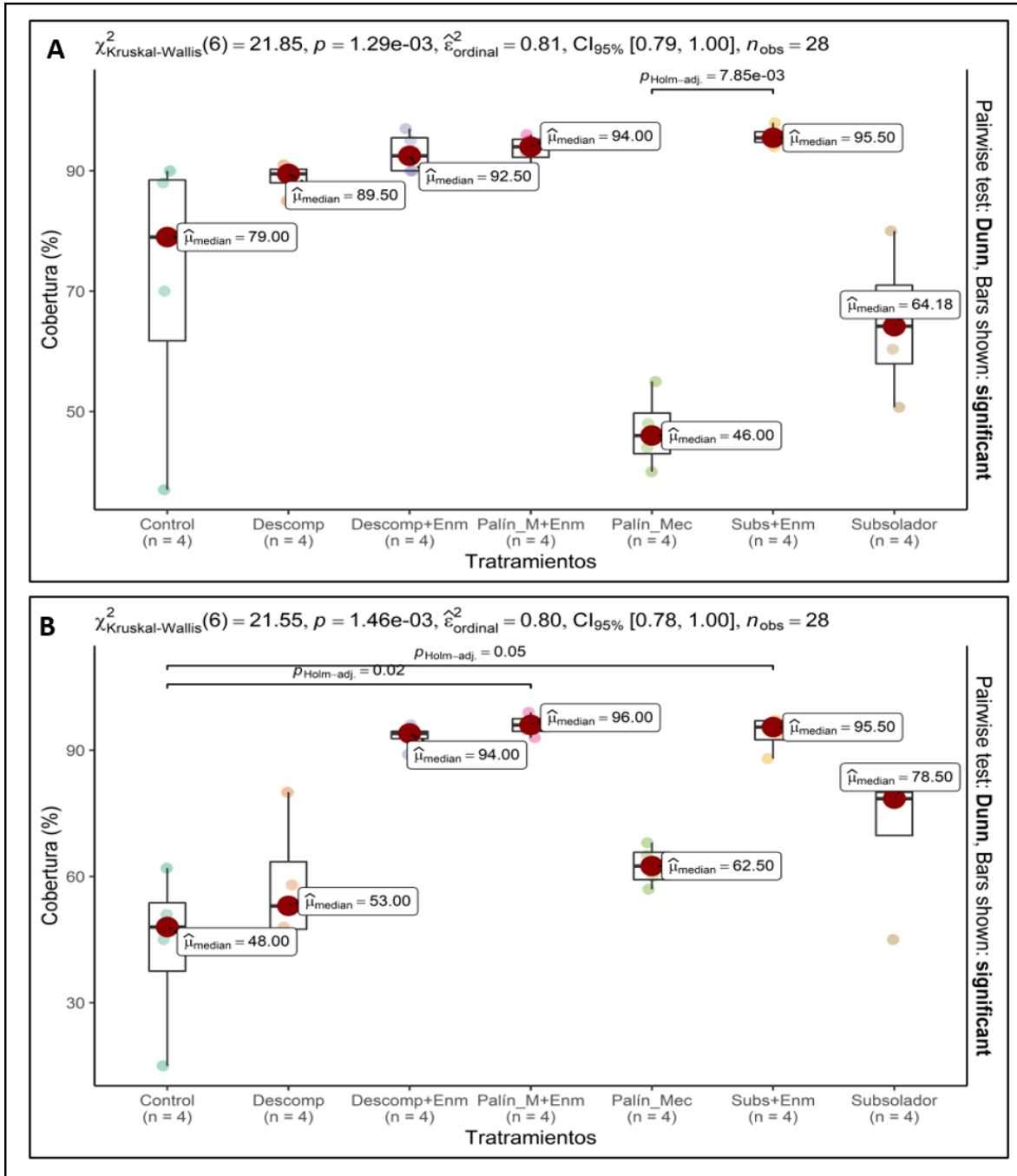
Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos.

**Figura 12.** Efecto la labranza mecanizada y enmiendas sobre la altura del pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Letras distintas indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo, el punto rojo indica la media.

### Cobertura

Los datos de cobertura mostraron ausencia de normalidad y homogeneidad de la varianza, por lo que fueron analizados con una prueba de Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica), realizando una comparación de las medianas con una prueba de Dunn para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Los resultados muestran que los tratamientos de labranza más enmienda presentaron los porcentajes más altos de cobertura, siendo el Subsolador+Enmienda el que mostró el valor más alto con una mediana de 95,50%, siendo significativamente distinto ( $p < 0,05$ ) del Palín Mecánico, que fue el tratamiento con la menor cobertura (46%) a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos. Ninguno de los tratamientos resultó distinto estadísticamente ( $p > 0,05$ ) del Control. A los 173 días, se observó un patrón similar, donde los tratamientos que incluían enmienda presentaron la mayor cobertura. El Palín Mecánico+Enmienda y Subsoladro+Enmienda mostraron los

mejores resultados con una mediana de 96 y 95% respectivamente, siendo significativamente diferentes del Control ( $p < 0,05$ ), que presentó los valores más bajos comparado incluso con los tratamientos sin enmienda. Sin embargo, ninguno de estos mostró ser significativamente distinto del Control.



A: efecto de los tratamientos sobre la cobertura a los 78 días; B: efecto de los tratamientos sobre la cobertura a los 173 días; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; Median: mediana

**Figura 13.** Análisis Kruskal-Wallis para muestras no paramétricas sobre el efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la cobertura del pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) a los 78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos, líneas representan comparación por pares por el método Dunn.

#### *Producción y calidad nutricional del pasto*

En cuanto a la producción de pacas por hectárea a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, es muy notable el efecto positivo de los tratamientos de labranza más enmienda. Todos mostraron ser ( $p < 0,05$ ) superiores al Control, de los cuales el Subsolador+Enmienda presentó la mayor producción potencial ( $423,06 \pm 32,51$  pacas/ha), obteniendo más del doble de producción que el Control ( $165 \pm 17,44$  paca/ha) y casi 5 veces más la producción obtenida con el Palín Mecánico ( $84,81 \pm 10,24$  pacas/ha) que fue el tratamiento que mostró la menor producción, aunque este no fue distinto ( $p > 0,05$ ) a los tratamientos sin enmienda y el Control. Luego de 173 días se logró apreciar un comportamiento similar, donde los tratamientos con enmienda volvieron a mostrar la mayor producción potencial, en este caso el Palín Mecánico+Enmienda obtuvo los mayores valores ( $268,97 \pm 26,57$  pacas/ha) y fue el único tratamiento significativamente distinto ( $p < 0,05$ ) al Control.

Para el caso de la proteína cruda y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca, los resultados muestran que los tratamientos no tuvieron influencia en estos parámetros, ya que no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre tratamientos en ninguno de los periodos de evaluación. Sin embargo, se observa una reducción relativa de la digestibilidad *in vitro* de la materia seca a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos en relación con los valores observados a los 78 días (con edades de rebrote de 95 y 78 días respectivamente).

**Cuadro 9.** Efecto de la labranza y enmiendas sobre la producción y calidad nutricional del pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) en dos momentos, letras distintas en la misma columna, indican diferencias significativas honestas de Tukey entre tratamientos por fecha de muestreo.

DDAT	Tratamientos	Pacas/ha	PC%	DIVMS%
78	Control	165±17,44 <sup>d</sup>	10,32±0,45 <sup>a</sup>	62,03±1,61 <sup>a</sup>
	Descomp	191,11±31,67 <sup>cd</sup>	9,18±0,54 <sup>a</sup>	60,93±0,63 <sup>a</sup>
	Descomp+Enm	316,53±10,36 <sup>ab</sup>	10,45±0,61 <sup>a</sup>	62,25±2,17 <sup>a</sup>
	Palín_M+Enm	290,42±34,73 <sup>bc</sup>	10,78±0,73 <sup>a</sup>	61,08±0,66 <sup>a</sup>
	Palín_Mec	84,81±10,24 <sup>d</sup>	10,53±0,24 <sup>a</sup>	61,85±1,6 <sup>a</sup>
	Subs+Enm	423,06±32,51 <sup>a</sup>	11,24±0,3 <sup>a</sup>	62,95±1,34 <sup>a</sup>
	Subsolador	114,03±19 <sup>d</sup>	9,71±0,57 <sup>a</sup>	64,5±1,44 <sup>a</sup>
173	Control	139,36±35,60 <sup>b</sup>	11,5±1,58 <sup>a</sup>	53,1±2 <sup>a</sup>
	Descomp	122,39±12,18 <sup>b</sup>	12±1,17 <sup>a</sup>	57,9±1,54 <sup>a</sup>
	Descomp+Enm	216,79±10,61 <sup>ab</sup>	10,5±0,75 <sup>a</sup>	62,5±2,47 <sup>a</sup>
	Palín_M+Enm	268,97±26,57 <sup>a</sup>	11±0,68 <sup>a</sup>	56,2±2,17 <sup>a</sup>
	Palín_Mec	138,23±9,24 <sup>b</sup>	12,3±1,26 <sup>a</sup>	57,1±1,94 <sup>a</sup>
	Subs+Enm	216,33±30,44 <sup>ab</sup>	12,1±0,65 <sup>a</sup>	56±1,39 <sup>a</sup>
	Subsolador	154,09±12,94 <sup>b</sup>	13,1±1,01 <sup>a</sup>	54,3±3,08 <sup>a</sup>

DDAT: días después de la aplicación de los tratamientos; Subs: Subsolador; Enm: Enmienda; Palín\_Mec o Palín\_M: Palín mecánico; Descomp: Descompactador; ha: hectárea; PC: proteína cruda; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca; ±: error estándar.

## DISCUSIÓN

### **Efecto de la labranza mecanizada y enmiendas sobre la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) y su calidad nutricional.**

En términos productivos, la altura de la planta es un indicador de rendimientos de los pastos con una correlación positiva con la biomasa vegetal, que junto con la cobertura son parámetros que sustentan la evaluación de la producción de forraje (Freeman et al., 2007). La respuesta del pasto a los tratamientos de labranza mostró resultados positivos incrementando la altura y la cobertura vegetal, sobre todo en los tratamientos de labranza + enmienda tanto a los 78 como a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Según Osuna-Ceja et al. (2006) el crecimiento aéreo de las plantas está intrínsecamente relacionado con su desarrollo radicular, por lo que en suelos que expresen propiedades físicas y químicas deficientes que limiten el crecimiento de la raíz como la mayoría de Ultisoles (West et al., 1997; Alvarado et al., 2014b; Medina M., 2016; dos Santos D. R. et al., 2018), la labranza se vuelve una alternativa de mejora para la producción vegetal. Por lo que la calidad del suelo determina en gran medida el crecimiento de los forrajes, que junto con la época y el patrón de lluvias definen su producción (Angulo-Arroyave & Rosero-Noguera, 2018). Por su parte, el encalado favorece la respuesta de los cultivos como resultado de la neutralización del  $Al^{+3}$ ,  $H^{+}$ , y/o  $Mn^{+2}$  y a su vez, por el incremento del contenido de bases del suelo (Kamprath, 1984), que junto a la fertilización orgánica contribuyen a la mejora de las propiedades del suelo y por ende el crecimiento de los cultivos (Demuner-Molina et al., 2014). Nuestros resultados son consistentes con lo reportado por Estrada Álvarez (2002) en su estudio sobre producción de pastos, en el cual determino que los sistemas de labranza que garantizan una mejora en la calidad física del suelo, permiten el mejoramiento en las condiciones de crecimiento de los pastos tropicales. Así mismo, Ramírez Pedroso et al. (2021), al evaluar el efecto del encalado sobre el crecimiento del pasto *Brachiaria* (*Brachiaria sp*) en un suelo ácido de baja fertilidad, concluyeron que, al mejorar el estado nutricional y el contenido de calcio en el suelo por efecto de la cal, el crecimiento y producción de pasto se vio favorecido significativamente y que su efecto se mantuvo durante los 2 primeros años. Cuyos incrementos son apreciados incluso en especies tolerantes a la acidez (Biazatti et al., 2020). Sin embargo, la calidad y

naturaleza del material encalante, son factores de los cuales depende la residualidad de estos efectos sobre la producción de forraje (Li et al., 2019).

La producción potencial de pacas por hectárea favorecido por los tratamientos de labranza más enmienda y su incremento en ambos periodos de evaluación comparados con el Control, se debe a que, en suelos con valores bajos de bases por procesos de lixiviación intensa y alto grado de meteorización de los materiales originales (Miller, 1983), la aplicación de mejoradores como la cal incrementan la concentración de estos elementos en el suelo (M. Santos et al., 2016) que junto con la aplicación de compost impulsa procesos biológicos, químicos y físicos, cuya interacción y sinergia promueven la mejora del suelo y la producción de biomasa vegetal (Zhang et al., 2019) al actuar como aportadores de nutrimentos directos e indirectos para las plantas (Demuner-Molina et al., 2014). Nuestros resultados concuerdan con Zhang et al. (2019), quienes determinaron que la aplicación de fertilizantes orgánicos estimula el desarrollo radicular y la biomasa vegetal. De igual manera, Olego et al. (2021) al evaluar la aplicación de una enmienda calcárea en un suelo ácido, obtuvieron incrementos en la producción de biomasa en un cultivo de centeno (*Secale cereale*), en ambos casos por una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo. Por lo que la aplicación conjunta de cal y abono orgánico incrementa la producción de forraje no solamente en la primera cosecha luego de su aplicación, sino que también en el segundo y tercer ciclo de cosecha (Islam et al., 2021).

En cuanto a la calidad nutricional del pasto en base a la proteína cruda y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca y la cero diferencia entre tratamientos, podría estar directamente relacionado a la edad del pasto. De acuerdo con Morales (2006) y Roncallo et al. (2012), las gramíneas forrajeras como el pasto Transvala, son capaces de mantener las características nutricionales, hasta los 45 días después del rebrote, a partir de este periodo se reduce significativamente la calidad. Sin embargo, la proteína cruda mantuvo valores muy por encima del 5%, que es el punto crítico de mínimo requerimiento de este parámetro en pastos tropicales, capaz de satisfacer la necesidad alimenticia del ganado (Poppi & McLennan, 1995). Por lo que 78 y 95 días desde el rebrote (tiempo de la primera y segunda evaluación respectivamente) permite una mayor producción de biomasa, pero una reducción de la calidad nutricional del pasto (Angulo-Arroyave & Rosero-Noguera, 2018).

Lo cual podría tener un efecto negativo en términos de alimentación del ganado, puesto que otros parámetros como la fibra detergente neutra tienden a incrementar con el tiempo, causando en el rumiante menor consumo por ocasionar sensación de saciedad (Morales et al., 2018) y que el suministro de nitrógeno para el animal proviene principalmente de los valores de proteína que el material contenga (Capstaff & Miller, 2018). En ese sentido, varios estudios han obtenido como resultado, que existe una relación inversa entre producción de biomasa y calidad nutricional del pasto con el paso del tiempo, en función de la digestibilidad y la proteína cruda (Ramírez et al., 2005; Lara Mantilla et al., 2010). A su vez, resultados similares fueron obtenidos por Villamar Moreira (2022) que al suministrar bioles bovinos al suelo no lograron observar cambios en la calidad de pasto saboya (*Megathyrsus maximus*).

## CONCLUSIONES

Los tratamientos de solo labranza al ser aplicados sobre el pasto ya establecido y no contar con una enmienda que estimule su recuperación en el corto periodo de tiempo, no mostraron resultados favorables en la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) en las condiciones de suelo en las que llevó a cabo el estudio.

Los tratamientos de labranza en conjunto con la aplicación de cal y compost, incrementaron significativamente la producción de pasto, alcanzando incluso a duplicar la producción.

La calidad nutricional del pasto transvala no fue alterada por los tratamientos aplicados en este estudio, luego de 78 y 95 días de rebrote (78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos respectivamente).



## LITERATURA

- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014b). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: II. mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliníticas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 107-131.
- Angulo-Arroyave, R., & Rosero-Noguera, R. (2018). Producción de forraje y calidad nutricional del pasto angleton climacuna (*Dichanthium annulatum*-Forssk-Stapf) para la producción de heno en La Dorada (Caldas). *Revista de Producción Animal*, 30(2), 12-17.
- Association of Official Analytical Chemist (AOAC). (1991). *Methods of analysis*. Washington D.C., USA: AOAC, Inc.
- Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, W. R., Chamen, W. C., Reicosky, D. C., Ribeiro, M. F., Hobbs, P. R. (2008). Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación. *Zaragoza-España: FAO-ACRIBIA, S.A.*
- Biazatti, R. M., Bergamin, A. C., Ferreira, W. S., Ferreira, E., Souza, F. R. de, Almeida, P. M. de, & Dias, J. R. M. (2020). Fitomassa do Capim-Braquiária e atributos químicos de um latossolo sob compactação induzida e doses de calcário / Phytomass of Brachiaria and chemical attributes of a latossil under induced compaction and doses of limestone. *Brazilian Journal of Development*, 6(8), Art. 8.
- Bol, R. (2010). Challenges and Opportunities for Carbon Sequestration in Grassland System – A Technical Report on Grassland Management and Climate Change Mitigation. *The Journal of Agricultural Science*, 148(6), 735-736.
- Camacho, M. E., Mata, R., Forsythe, W., Camacho, M. E., Mata, R., & Forsythe, W. (2015). Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y

- sus implicaciones físicas e hidropedológicas. *Agronomía Costarricense*, 39, 101-115.
- Capstaff, N. M., & Miller, A. J. (2018). Improving the Yield and Nutritional Quality of Forage Crops. *Frontiers in Plant Science*, 9, 535
- Dawson, L. A., Thornton, B., Pratt, S. M., & Paterson, E. (2004). Morphological and topological responses of roots to defoliation and nitrogen supply in *Lolium perenne* and *Festuca ovina*. *New Phytologist*, 161(3), 811-818.
- Demuner-Molina, G., Cadena-Zapata, M., Campos-Magaña, S. G., Zermeño-González, A., & Sánchez-Pérez, F. de J. (2014). Efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y desarrollo radicular. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 123-130.
- dos Santos, D. R., Tiecher, T., Gonzatto, R., Santanna, M. A., Brunetto, G., & da Silva, L. S. (2018). Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. *Soil and Tillage Research*, 180, 222-231.
- Estrada Alvarez, J. (2002). *Pastos y forrajes para el trópico colombiano*. Editorial Universidad de Caldas.
- [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Pastos+y+forrajes+para+el+tro%C3%81pico+colombiano&author=Estrada+Alvarez%2C+Julia%CC%81n.&publication\\_year=2002](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Pastos+y+forrajes+para+el+tro%C3%81pico+colombiano&author=Estrada+Alvarez%2C+Julia%CC%81n.&publication_year=2002)
- Freeman, K. W., Girma, K., Arnall, D. B., Mullen, R. W., Martin, K. L., Teal, R. K., & Raun, W. R. (2007). By-Plant Prediction of Corn Forage Biomass and Nitrogen

- Uptake at Various Growth Stages Using Remote Sensing and Plant Height. *Agronomy Journal*, 99(2), 530-536.
- García, R. (2015). Efecto de sistemas de labranza en propiedades físicas del suelo y desarrollo radicular del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* W.). *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 18(35), Art. 35.
- Islam, M. R., Jahan, R., Uddin, S., Harine, I. J., Hoque, M. A., Hassan, S., Hassan, M. M., & Hossain, M. A. (2021). Lime and Organic Manure Amendment Enhances Crop Productivity of Wheat–Mungbean–T. Aman Cropping Pattern in Acidic Piedmont Soils. *Agronomy*, 11(8), Art. 8.
- Kamprath, E. J. (1984). Crop response to lime on soils in the tropics. *Soil acidity and liming*, 12, 349-368.
- Kendall, C., Leonardi, C., Hoffman, P. C., & Combs, D. K. (2009). Intake and milk production of cows fed diets that differed in dietary neutral detergent fiber and neutral detergent fiber digestibility. *Journal of Dairy Science*, 92(1), 313-323.
- Lara Mantilla, C., Oviedo Zumaqué, L. E., & Betancur Hurtado, C. A. (2010). Efecto de la época de corte sobre la composición química y degradabilidad ruminal del pasto *Dichanthium aristatum* (Angleton). *Zootecnia Tropical*, 28(2), 275-282.
- Li, Y., Cui, S., Chang, S. X., & Zhang, Q. (2019). Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: A global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3), 1393-1406.
- Medina M., C. (2016). Effects of soil compaction by trampling of animals in soil productivity. Remediations. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 88.

- Miller, B. J. (1983). Chapter 8 Ultisols. In *Developments in Soil Science* 11, 283-323. Elsevier.
- Montanari, R., Lima, E. de S., Lovera, L. H., Godoy, L. T. R., Henrique, A. F., & Dalchiavon, F. C. (2013). Correlación de la productividad de un forraje con las propiedades físicas de un Ultisol en Aquidauana. *Revista Ceres*, 60, 102-110.
- Morales, E. B., Sánchez, J. B., León, R., Aguas, S. B., & Mohiddin, J. (2018). Evaluación del pasto miel (*Setaria sphacelata*) por efecto de la fertilización y enmienda química, en noroccidente, Pichincha-Ecuador. *Ciencia*, 20(2), Art. 2.
- Morales J, Acuña V, Cruz A. (2006). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y valor nutritivo del pasto transvala (*Digitaria decumbens* cv. Transvala) para henificación, bajo condiciones de riego. *Alcances tecnológicos*, 4, (1),45-51.
- Olego, M. Á., Quiroga, M. J., Mendaña-Cuervo, C., Cara-Jiménez, J., López, R., & Garzón-Jimeno, E. (2021). Long-Term Effects of Calcium-Based Liming Materials on Soil Fertility Sustainability and Rye Production as Soil Quality Indicators on a Typic Palexerult. *Processes*, 9(7), Art. 7.
- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., González-Cossío, F. V., Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., & González-Cossío, F. V. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40(1), 27-38.
- Piedra Quesada, V. (2017). División territorial administrativa de la República de Costa. San José: Imprenta Nacional.
- Poppi, D. P., & McLennan, S. R. (1995). Protein and energy utilization by ruminants at pasture. *Journal of Animal Science*, 73(1), 278-290.

- Ramírez Pedroso, J. F., González Cañizares, P. J., Rivera Espinosa, R., Hernández Jiménez, A., Ramírez Pedroso, J. F., González Cañizares, P. J., Rivera Espinosa, R., & Hernández Jiménez, A. (2021). Respuesta al encalado de pastos del género *Urochloa*, cultivados en la región Sabana de Manacas, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2).
- Ramírez, R. G., González-Rodríguez, H., García-Dessommes, G., & Morales-Rodríguez, R. (2005). Seasonal Trends in Chemical Composition and Digestion of *Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf. *Journal of Applied Animal Research*, 28(1), 35-40.
- Roncallo, B., Sierra, A. M., & Castro, E. (2012). Rendimiento de forraje de gramíneas de corte y efecto sobre calidad composicional y producción de leche en el Caribe seco. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 13(1), Art. 1.
- Roque Garcia. (2015). Efecto de sistemas de labranza en propiedades físicas del suelo y desarrollo radicular del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* W.). *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 18(35): 109-113.
- Santos, M., de Oliveira Castro, Y., Marques, R., Débora, R., Godoy, M., & Patrícia, N. (2016). Importância da calagem, adubações tradicionais e alternativas na produção de plantas forrageiras: *Revisão. Pubvet*, 10, 1-12.
- Serrano, J., Shahidian, S., Marques Da Silva, J., Sales-Baptista, E., Ferraz De Oliveira, I., Lopes De Castro, J., Pereira, A., Cancela De Abreu, M., Machado, E., & Carvalho, M. de. (2018). Tree influence on soil and pasture: Contribution of proximal sensing to pasture productivity and quality estimation in montado ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, 39(14), 4801-4829.
- Solano, J. & Villalobos, R. (2012). Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica. San José: *Instituto Meteorológico Nacional*

- Tecnológicos, A. (2019). La Industrialización del heno de alta calidad en Costa Rica. *Alcances Tecnológicos*, 4(1), 2.
- Villalobos, L. A., & WingChing Jones, R. (2020). Los pastos estrella africana, kikuyo y “rye grass” en Cartago, Costa Rica: Biomasa, composición botánica y nutrientes. *Cuadernos de Investigación UNED*, 12, 1.
- Villamar Moreira, J. P. (2022). *Efectos del biol bovino en rendimientos de biomasa verde y valores nutricionales del pasto saboya (Megathyrsus maximus)* [BachelorThesis, Calceta: ESPAM MFL]. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1881>
- West, L. T., Beinroth, F. H., Sumner, M. E., & Kang, B. T. (1997). Ultisols: Characteristics and Impacts on Society. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, 63, 179-236.
- Zhang, J., Bei, S., Li, B., Zhang, J., Christie, P., & Li, X. (2019). Organic fertilizer, but not heavy liming, enhances banana biomass, increases soil organic carbon and modifies soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, 136, 67-79.

## DISCUSIÓN GENERAL

Los valores más altos de C<sub>oxp</sub> a los 78 días correspondieron a los tratamientos de labranza con la adición de enmienda. Lo que podría deberse a que la enmienda utilizada es rica en carbono orgánico (16,40 %) poco descompuesto, cuyos materiales constituyentes y formas más lábiles aun forman parte de este material y que al ser incorporados al suelo contribuyeron con formas de carbono orgánico de fácil mineralización. Estos resultados son consistentes con estudios realizados por Comese et al. (2009) y Olchin et al. (2008). El incremento en C<sub>oxp</sub> experimentado a 173 DDAT y la reducción de las diferencias entre tratamientos a los 263 DDAT en comparación con los valores registrados a los 78 DDAT por todos los tratamientos (excepto el Subsolador+Enmienda), podría estar relacionado principalmente al paso del tiempo y la acumulación de tejido vegetal suministrado por el sistema de producción de pastos (Capítulo 3). Estos cambios de concentración del carbono orgánico del suelo se explican por el incremento de la biomasa de las raíces en suelos bajo pastos perennes (Haynes et al., 1991; Bojórquez Serrano et al. 2015).

Se demostró que los cambios a corto plazo en el C<sub>tot</sub> del suelo son muy difíciles de evidenciar dado a la amplia gama de fracciones tanto lábiles como recalcitrantes que abarca el C<sub>tot</sub>. Los resultados de cero diferencias entre los tratamientos de labranza y enmiendas durante todo el experimento (Figuras 2), podrían estar asociados principalmente al corto periodo de tiempo en el que se evaluó el efecto de los tratamientos. Cambardella & Elliott, (1992) sugieren que el C<sub>tot</sub> no es homogéneo en términos estructurales, más bien se compone de diversas sustancias que varían en sus características químicas y físicas, y que a su vez presentan distintas tasas de descomposición cuyo cambio no es fácilmente observado en el corto periodo de tiempo (Hurisso et al., 2016).

Cambios relativamente pequeños en el Carbono orgánico del suelo como resultado de las prácticas de manejo, son generalmente difíciles de evaluar, pero pueden tener efectos pronunciados en el comportamiento del sistema edáfico y los procesos microbiológicos. El contrastar los cambios en el manejo del suelo y las alteraciones en el carbono orgánico puede llevar varios años para encontrar cambios cuantificables (Weil et al., 2003). Por lo general esto podría deberse al alto porcentaje de formas de C recalcitrante o humificado (Sikora et al., 1996). Las alteraciones en fracciones pequeñas, pero potencialmente

oxidables (lábil) de C orgánico del suelo con la metodología Coxp, podrían funcionar como indicadores tempranos del deterioro de las propiedades del suelo, o la mejora de estas, con el cambio en sus prácticas de manejo (Weil et al., 2003).

Al evaluar la acidez a los 78 y 173 días se logró observar una reducción de este parámetro con los tratamientos de labranza más enmienda en comparación con el control. Encontrando valores incluso por debajo del nivel crítico (0,50 cmol(+)/L) para el caso de los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda en ambos periodos de evaluación, por efecto de aplicación de una enmienda calcárea ( $\text{CaCO}_3$ ), la que actúa reduciendo los niveles de acidez del suelo (Chaplain et al., 2011; Rheinheimer et al., 2018; Cifu et al. 2004).

Por su parte, ninguno de los tratamientos incrementó el pH por arriba del nivel crítico a los 78 días después de la aplicación de los tratamientos, pero, a los 173 superaron este nivel crítico los tratamientos Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda. Esto puede deberse a la alta capacidad buffer de los coloides minerales y orgánicos de carga variable que tienden a estabilizar el pH en estos suelos (Osorno & Osorno, 2010). La saturación de acidez también fue influenciada positivamente por los tratamientos de labranza con enmienda, presentando estos un valor óptimo (<10%) en las dos etapas de evaluación (78 y 173 días) al igual que el Descompactador. Las diferencias en el pH y la saturación de acidez a los 173 días pueden estar asociadas a que la acción de los materiales encalates tiende a presentar mayor efectividad luego de cierto tiempo, que, de acuerdo con la calidad del material, este logra en su totalidad reaccionar químicamente en el suelo (Molina & Rojas, 2005; Irkiso, 2014).

El efecto de los tratamientos fue particularmente notorio en el contenido de calcio del suelo, que, para el caso específico de los tratamientos de labranza con enmienda, los valores de esta base fueron incrementados a un nivel óptimo (6-15 cmol(+)/L), Esto se asocia principalmente a la fuente de encalado utilizada en este estudio ( $\text{CaCO}_3$ ), la cual está constituida principalmente por 39,3% de Ca, (Molina & Rojas, 2005).

La reducción de la densidad aparente y el consecuente incremento de la porosidad observada a los 78 días en los, está directamente relacionado a los sistemas de labranza



implementados, que permiten el aflojamiento del suelo, rompiendo la continuidad de meso y microporos edáficos, promoviendo de esta manera una reducción temporal de la densidad edáfica, un incremento de poros de mayor tamaño y reducción en la resistencia a la penetración (Kay & VandenBygaart, 2002), y que además, genera una ruptura de las capas compactadas (Demuner-Molina et al., 2014). En este sentido destacan los tratamientos de Palín Mecánico+Enmienda y Subsolador+Enmienda, puesto que, estas propiedades pueden verse favorecidos por una buena estructuración del suelo producto de la actividad microbiana al descomponer los residuos orgánicos aplicados (Martínez et al., 2010).

Los altos contenidos de humedad que muestra el suelo aun, a tensiones superiores al punto de marchitez permanente, sugiere que los suelos viejos altamente meteorizados como los Ultisoles, en su mayoría presentan predominancia de caolinita, lo que les confiere una baja capacidad de expandirse y contraerse permitiendo una alta retención de humedad por periodos prolongados de tiempo (West et al., 1997). Por otro lado, el rol de la estructura es fundamental en el flujo, distribución y retención del agua del suelo, por lo que cualquier perturbación en el sistema edáfico que afecte la distribución y arreglo de sus agregados, se traducirá en un proceso de deterioro, el cual tiene relación directa con la compactación del suelo y las relaciones hídricas suelo-planta (Osuna-Ceja et al., 2006). Lo que explica que el tratamiento Control mostrara siempre los mayores valores de humedad volumétrica, no así el contenido de humedad disponible y fácilmente disponible en lo cual se destacaron los tratamientos de Palín Mecánico, Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda.

La respuesta del pasto a los tratamientos de labranza mostró resultados positivos incrementando la altura y la cobertura vegetal, sobre todo en los tratamientos de labranza + enmienda, tanto a los 78 como a los 173 días después de la aplicación de los tratamientos. Según Osuna-Ceja et al. (2006) el crecimiento aéreo de las plantas esta intrínsecamente relacionado con su desarrollo radicular, por lo que en suelos que expresen propiedades físicas y químicas deficientes que limiten el crecimiento de la raíz como la mayoría de Ultisoles (West et al., 1997; Alvarado et al., 2014b; Medina M., 2016; dos Santos D. R. et al., 2018), la labranza se vuelve una alternativa de mejora para la producción vegetal. Por su parte, el encalado favorece la respuesta de los cultivos como resultado de la neutralización del  $Al^{+3}$ ,  $H^{+}$ , y/o  $Mn^{+2}$  y a su vez, por el incremento del contenido de bases

del suelo (Kamprath, 1984), que junto a la fertilización orgánica contribuyen a la mejora de las propiedades del suelo y por ende el crecimiento de los cultivos (Demuner-Molina et al., 2014). Nuestros resultados son consistentes con lo reportado por Estrada Álvarez (2002) y Ramírez Pedroso et al. (2021), en sus estudios sobre producción de pastos, en el cual determino que los sistemas de labranza que garantizan una mejora en la calidad física del suelo, permiten el mejoramiento en las condiciones de crecimiento de los pastos tropicales.

La producción potencial de pacas por hectárea favorecido por los tratamientos de labranza más enmienda y su incremento en ambos periodos de evaluación comparados con el Control, se debe a que, en suelos con valores bajos de bases por procesos de lixiviación intensa y alto grado de meteorización de los materiales originales (Miller, 1983), la aplicación de mejoradores como la cal incrementan la concentración de estos elementos en el suelo (M. Santos et al., 2016) que junto con la aplicación de compost impulsa procesos biológicos, químicos y físicos, cuya interacción y sinergia promueven la mejora del suelo y la producción de biomasa vegetal (Zhang et al., 2019) al actuar como aportadores de nutrimentos directos e indirectos para las plantas (Demuner-Molina et al., 2014).

En cuanto a la calidad nutricional del pasto en base a la proteína cruda y la digestibilidad In-vitro de la materia seca y la cero diferencia entre tratamientos, podría estar directamente relacionado a la edad del pasto. De acuerdo con Morales (2006) y Roncallo et al. (2012), las gramíneas forrajeras como el pasto Transvala, son capaces de mantener las características nutricionales, hasta los 45 días después del rebrote, a partir de este periodo se reduce significativamente la calidad. Sin embargo, la proteína cruda mantuvo valores muy por encima del 5%, que es el punto crítico de mínimo requerimiento de este parámetro en pastos tropicales, capaz de satisfacer la necesidad alimenticia del ganado (Poppi & McLennan, 1995). Por lo que 78 y 95 días desde el rebrote (tiempo de la primera y segunda evaluación respectivamente) permite una mayor producción de biomasa, pero una reducción de la calidad nutricional del pasto (Angulo-Arroyave & Rosero-Noguera, 2018).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El carbono orgánico, figura como una de los parámetros más importantes en la calidad edáfica y que tiene influencia en las demás propiedades. Si embargo la evaluación de su dinámica es algo muy complejo, cuyo análisis se realiza en su mayoría a través, del carbono total del suelo. El cual es un parámetro muy poco susceptible a los efectos del manejo a corto plazo, ya que en el suelo podemos encontrar fracciones de carbono orgánico con distintos grados o susceptibilidad a la mineralización (lábil y recalcitrante). Por lo que el carbono activo con permanganato de potasio figura como alternativa viable e indicador temprano del efecto del manejo sobre el carbono edáfico. En ese sentido, la labranza por sí sola no propicia la acumulación del carbono activo, lo que si sucede cuando esta se combina con el uso de enmiendas, que de igual manera muestra efectos positivos en la tasa de respiración microbiana, que es un parámetro dependiente de las condiciones de suelo. En cuyo caso, el Subsolador+Enmienda presentó los mejores resultados generales.

Por la naturaleza acida del suelo en estudio (Ultisol) y su pobreza nutricional, las propiedades químicas no se ven influenciadas por los tratamientos de labranza utilizados en este experimento, salvo cuando estos son implementados en conjunto con una enmienda, cuyos efectos positivos se mantienen incluso luego de 173 días después de su aplicación. Ofreciendo una corrección significativa de las propiedades acidas del suelo (acidez, pH, saturación de acidez), un incremento de bases como el calcio y el potasio y así mismo una reducción del contenido de hierro y manganeso edáfico, cuyos efectos más promisorios se presentaron en los tratamientos de Palín Mecánico+Enmienda y Descompactador+Enmienda. Por lo que la adición de una enmienda calcárea y orgánica en estas condiciones es imprescindible para alcanzar buenos resultados. Por su parte, las propiedades físicas se ven mejoradas con la labranza por si sola por el efecto directo del implemento y su mecanismo de acción, que rompe las capas compactadas de suelo, reduciendo la densidad aparente, incrementando la porosidad y promoviendo las propiedades hidropedológicas. Sin embargo, muestran resultados aún más favorables si además se utiliza una enmienda, que, de manera indirecta, promueve la actividad microbiana y la sinergia de las propiedades en el sistema edáfico. Obteniendo los

mejores resultados en términos generales el Subsolador+Enmienda y el Palín Mecánico+Enmienda.

Un factor muy importante que se debe considerar a la hora de aplicar un tratamiento de labranza en un pasto ya establecido, es el daño mecánico que este produce en el pasto. Lo que implica un mayor esfuerzo para recuperarse del daño producido por el implemento y la demanda nutritiva del pasto para producir follaje. Por lo que los tratamientos de solo labranza en especial el Palín Mecánico, no muestran resultados favorables en la producción de pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent.) para la primera cosecha. Por otro lado, los tratamientos de labranza + enmienda incrementaron significativamente la producción de pasto, alcanzando incluso a duplicar la producción, principalmente con el uso del Subsolador+Enmienda y el Palín Mecánico+Enmienda que presentaron los mejores resultados. Sin embargo, no logramos identificar un efecto significativo de los tratamientos sobre la calidad nutricional del pasto luego de 78 y 95 días de rebrote (78 y 173 días después de la aplicación de los tratamientos respectivamente). Lo que probablemente esté ligado al corte tardío del pasto, el cual expresa su máximo valor nutricional luego de 45 días de rebrote. Sin embargo, a esta edad, el pasto en estas condiciones no alcanza una producción de biomasa suficiente para satisfacer las necesidades del productor. Por lo tanto, es necesario encontrar un balance entre producción de biomas y calidad nutricional del pasto.