

## LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO RESPONDE A LOS SISTEMAS DE LABRANZA EN AMBIENTES SEMIARIDOS

Juan Pablo Frene<sup>1,3,\*</sup>, Luciano Andrés Gabbarini<sup>2,3</sup>, Natalia Belén Robledo<sup>1</sup>, Luis Gabriel Wall<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Bioquímica y Biología del Suelo, Centro de Bioquímica y Microbiología del Suelo, Universidad Nacional de Quilmes. Bernal, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Laboratorio de Nanosistemas de Aplicación Biotecnológica, Universidad Nacional de Hurlingham, Argentina.

<sup>3</sup>Coautores con contribución equivalente.

### RESUMEN

El suelo es el principal reservorio biológico del planeta, ya que se transforma en organismos vivos, desde las plantas hasta las comunidades microbianas. Los diferentes manejos y usos del suelo modifican las propiedades de los mismos, condicionando la estructura de las comunidades microbianas. Este trabajo tuvo como objetivo comparar la actividad biológica de suelos bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) posterior a la siembra (primavera) y a la cosecha (otoño) de maíz (*Zea mays* L) en Tornquist, Argentina. Se tomaron muestras a dos profundidades, 0-5 y 5-10 cm, y se determinaron diversos parámetros químicos (carbono orgánico total, fósforo extraíble y carbono de la biomasa microbiana), físico (agregados) y bioquímicos/biológicos (actividades enzimáticas y perfiles fisiológicos a nivel de comunidades). Nuestros resultados muestran que la SD incrementa los macroagregados y las actividades enzimáticas del suelo mientras que la LC incrementa la biomasa microbiana y la respiración del suelo. Además, la biomasa microbiana correlacionó positivamente con los microagregados, mientras que la actividad enzimática lo hizo con los macroagregados de forma positiva. Nuestros resultados confirman la necesidad de continuar estudiando los sistemas de labranza para comprender mejor el funcionamiento de la actividad biológica de los suelos.

**Palabras clave:** enzimas del suelo, respiración del suelo, siembra directa, agregados

## THE SOIL BIOLOGICAL ACTIVITY RESPONDS TO TILLAGE SYSTEMS IN SEMIARID ENVIRONMENTS

### ABSTRACT

Soil is the main biological reservoir on the planet, since it is transformed into living organisms, from plants to microbial communities. Different management practices and uses of the soil modify its properties, affecting the structure of the microbial communities. This work aimed to compare the biological activity of soils under conventional tillage (LC) and no-tillage (SD) after sowing (spring) and harvest (autumn) of corn (*Zea mays* L) in Tornquist, Argentina. Soil samples were taken at two depths, 0-5 and 5-10 cm, and various chemical (total organic carbon, extractable phosphorus, microbial biomass carbon), physical (aggregates), and biochemical/biological parameters (soil enzyme activities and community physiological profile) were determined. Our results show that SD increases soil macroaggregates and enzymatic activities while LC increases microbial biomass and soil respiration. Furthermore, microbial biomass positively correlated with micro aggregates, while enzymatic activity correlated positively with macro aggregates. Our results confirm the need to continue studying tillage systems to better understand the functioning of soil biological activity.

**Keywords:** soil enzymes, soil respiration, no-tillage, aggregates

\* Autores de contacto:  
wall.luisgabriel@gmail.com  
juanpablofrene@gmail.com

Recibido:  
14-04-24

Recibido con revisiones:  
16-07-24

Aceptado:  
16-07-24

## INTRODUCCIÓN

El suelo es el principal reservorio biológico del planeta donde ocurre la transformación de la materia y el ciclado de los elementos químicos (Custodio et al., 2022). Las prestaciones funcionales del suelo sientan sus bases en los organismos vivos que lo habitan, desde las plantas pasando por la macro y microfauna hasta las comunidades microbianas (Wall et al., 2019). Los microorganismos del suelo cumplen un rol fundamental llevando a cabo los principales procesos biogeoquímicos, el ciclado de la materia orgánica (MO), y regulando las funciones ecosistémicas que dan forma a la salud del suelo (Fierer, 2017). Los diferentes manejos y usos del suelo modifican las propiedades del suelo (Galantini et al., 2013), y esto condiciona la estructura de las comunidades microbianas que lo habitan (Magdoff y Van, 2021). Por lo cual, la transición de los productores agrícolas hacia sistemas agronómicos basados en manejos conservativos es importante para el aumento de la “salud del suelo”, la disminución de la erosión y preservación del mismo para las generaciones futuras (Albertengo et al., 2014).

Los sistemas de labranza más utilizados en nuestro país son la labranza convencional (LC) y la siembra directa (SD). La LC es una práctica de manejo del suelo en la cual, los residuos de los cultivos son incorporados al mismo a través del uso del arado y la rastra (Magdoff y Van, 2021). Este tipo de labranza se utiliza con el fin de enterrar la materia orgánica para producir su mineralización, airear el suelo, reducir la compactación y el control de plagas, lo que incrementa la germinación de las semillas y el rendimiento de los cultivos según la historia del suelo, sobre todo en climas húmedos (Raper et al., 2000). Sin embargo, la LC aumenta la erosión del suelo por pérdida de materia orgánica y la pérdida de la estructura, disminuyendo la calidad del suelo debido a la disminución de los agregados y por ende su estructura, afectando así otras propiedades como la infiltración o el secuestro de carbono (C) (Chalise et al., 2020).

En contraposición a la LC, la siembra directa (SD) es el primer paso para transaccionar hacia sistemas agrícolas conservacionistas que permiten cuidar e incrementar la salud del suelo (Afshar et al., 2022). La SD es utilizada como uno de los pilares de la agricultura conservacionista debido a que mejora la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, incrementando los stocks de carbono, y proporcionando un mejor hábitat y sustrato para la biota (Holland, 2004). Beneficios adicionales de la SD están relacionados con disminuir la erosión hídrica y eólica, conservar el agua y reducir los costos económicos y energéticos (Grandy et al., 2006). Sin embargo, entre los efectos negativos de la SD podemos encontrar la estratificación de la MO, la compactación del suelo, y una mayor presión de malezas debido a que las semillas quedan en la superficie (Afshar et al., 2022). Para comprender el impacto de las prácticas agrícolas conservativas en nuestros suelos, es necesario comprender mejor cómo las propiedades fisicoquímicas del suelo están relacionadas con los microorganismos que lo habitan y su actividad.

Como la SD está basada en la no perturbación del suelo y la acumulación en superficie de los rastrojos de los cultivos predecesores, se produce un gradiente vertical de C y nutrientes que disminuye hacia las capas inferiores del suelo. Esto contrasta con la LC, que distribuye los nutrientes y los restos vegetales dentro del perfil superior del suelo que se remueve (20 cm aproximadamente) (Franzluebbers y Hons, 1996). La distribución de los nutrientes tiene un significativo efecto en los microorganismos y su actividad (Sun et al., 2018). Sumado a la distribución de los nutrientes, la época del año también impacta en los microbios y en la actividad del suelo (Ge et al., 2010), ya que dependiendo de la época cambia su temperatura y humedad. Estudios previos han mostrado que en la actividad del suelo analizada a través de los perfiles fisiológicos a nivel de comunidades (CLPP) permite diferenciar manejos en invierno mejor que en verano (Frene et al., 2019). En función de lo anterior consideramos que la evaluación en la escala temporal y la escala espacial es necesaria para una mejor comprensión de los microorganismos y la actividad en el suelo.

Este trabajo tuvo como objetivo comparar, a nivel químico, físico y bioquímico, suelos con manejos de LC y SD en dos momentos diferentes del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), primavera (principios de diciembre cercanos a la siembra) y otoño (principios de junio y cercanos a la cosecha). Para ello se estudiaron los suelos de un ensayo de larga duración con 30 años de historia de manejo paralelo en SD o en LC en un establecimiento en la localidad de Torquinst (Provincia de Buenos Aires) por medio de la medición de las actividades enzimáticas, la cuantificación del carbono de la biomasa microbiana ( $C_{mic}$ ) y los CLPP. Hipotetizamos que las SD aumenta las actividades enzimáticas y el  $C_{mic}$  (Acosta-Martínez et al., 2007) pero la LC presentara mayores valores de respiración en el CLPP (Gómez et al., 2004).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio y muestreo de los suelos

El sitio de estudio corresponde a un emprendimiento agropecuario localizado en el Establecimiento Hogar Funke (Tornquist, Provincia de Buenos Aires, Argentina; 38°09'S 61°57'O). El suelo es Argiudol Típico y es representativo de la región pampeana central-sudeste semiárida. El suelo fue sistematizado con terrazas sin gradiente en 1975, estimándose pérdidas de suelo en los años previos de escasa consideración. La temperatura anual promedio y las precipitaciones son 15 °C y 799 mm, respectivamente.

El diseño experimental consta de dos parcelas linderas de 8 Ha, establecido originalmente en 1986, con el propósito de contrastar dos sistemas de labranza: SD y LC. La LC fue llevada adelante utilizando cincel y rastra de disco con una profundidad de 7-20 cm. Mientras tanto, la SD se caracterizó por la ausencia de labranza con más del 30% de residuos cubriendo la superficie del suelo en todo momento. Bajo este sistema, se utilizó una sembradora directa (sembradora John Deere 750, John Deere Argentina S.A.) para sembrar directamente sobre los residuos en pie del cultivo anterior. Se aplicó un herbicida (2 L ha<sup>-1</sup> de glifosato) para el control de malezas. Las parcelas fueron fertilizadas con 10 kg P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> como fosfato diamónico (18-46-0) al momento de la siembra bajo ambos sistemas de labranza. Durante el período (1986-2011), la secuencia de cultivos fue: M-T-G-T-G-T-S-C-M-C-M-T-M-T-C-G-T-T-G-C-G-T-M-T (sin cosecha por sequía)-T-T (siendo: M, maíz; T, trigo; G, girasol; C, cebada; S, sorgo). Exceptuando el laboreo del suelo, todas las otras prácticas agrícolas siempre fueron similares entre ambas parcelas, cultivos, aplicaciones de agroquímicos, etc. Una descripción más exhaustiva del ensayo con sus resultados en aumento de productividad por SD con el tiempo puede encontrarse en Martínez et al. (2017).

Los muestreos se realizaron en puntos geolocalizados (SD: 38°10' 40.152"S 61°59'46.834"O y LC: 38°10' 40.708"S 61°59'45.369"O) durante la primavera tardía en los primeros días de diciembre de 2012 posterior a la siembra y en mayo de 2013 (otoño) posterior a la cosecha de maíz. Se tomaron 10 submuestras para cada tratamiento distribuidas de forma de cubrir la mayor área posible las parcelas. Cada submuestra se compuso por 25 piques de barreno, de 2 cm de diámetro, en un área de 5 m<sup>2</sup>. Cada pique de barreno fue separado de acuerdo a dos profundidades 0-5 y 5-10 cm. Las muestras fueron conservadas en frío y llevadas al laboratorio, donde fueron almacenadas en heladera a 4° C previa preparación de éstas por pasaje por un tamiz de 2 mm.

### Análisis de los Perfiles Fisiológicos a Nivel de las Comunidades (CLPP) de suelo

Se utilizaron las microplacas de 96 pocillos con el sistema biosensor de oxígeno (OBS) para los análisis de los perfiles fisiológicos de las comunidades microbianas del suelo. Las placas OBS utilizadas en esta parte del trabajo fueron diseñadas y manufacturadas de acuerdo con el trabajo de McLamore et al. (2014). En cada pocillo se agregaron 40 µL de las soluciones de las fuentes de C o agua desionizada estéril para determinar la respiración inducida por sustrato o la respiración basal, respectivamente. Las suspensiones de suelo (160 µL) fueron pipeteadas en cada pocillo, resultando en un volumen final de 240 µL con el agregado de 40 µL de agua desionizada estéril. Las suspensiones de suelo fueron preparadas mezclando 1 g de suelo con 5 mL de agua destilada estéril en un tubo de 15 mL conteniendo aproximadamente 5 mL de perlitas de metal de 2 mm para mezclado y homogenizado mediante ULTRA TURRAX Tube Drive (IKA, Alemania) durante 2 min. Las soluciones madre de fuente de C (300 µg L<sup>-1</sup>) y de N (60 µg L<sup>-1</sup>) fueron preparadas para obtener una concentración final de 50 mg L<sup>-1</sup> de C. Las fuentes de C seleccionadas para el análisis de los CLPP fueron el Ácido p-Cumárico, Ácido Propiónico y Ácido Vinílico (Sigma, E.E.U.U.). Todas las soluciones stocks y el agua destilada fueron esterilizadas utilizando filtros (< 0,22 µm, Sartor, E.E.U.U.) y almacenados a 4° C previos a ser ensayadas en las microplacas.

Los datos de las cinéticas fluorescentes del consumo de O<sub>2</sub> fueron reportados como unidad de fluorescencia relativa normalizados (UFRN), al dividir el valor de fluorescencia en cada punto por el valor de 1 h después de haber comenzado el ensayo. El tiempo mínimo de respuesta (TMR) fue definido como el tiempo necesario para que se alcance un valor de 1.1 de UFRN. El pico de la respuesta fluorescente (Fmax) fue calculado para todas las muestras como otro parámetro de la actividad respiratoria, asumiendo una tasa de difusión constante.

### Análisis de la actividad de enzimas extracelulares

El análisis de la actividad potencial de enzimas hidrolíticas se realizó mediante ensayos en placas de 96 pocillos, por fluorescencia (Marx et al., 2001; Truong et al., 2019). Las muestras de suelo fueron ensayadas como fuente de enzimas para las siguientes actividades enzimáticas: β-cellobiohidrolasa (CEL), N-ace-

til- $\beta$ -glucosaminidasa (NAG),  $\beta$ -glucosidasa (BG), fosfatasa (PME), y arilsulfatasa (SUL).

La suspensión de suelo analizadas se realizó agregando 0,1 g de suelo a un tubo de 20 mL (BMT-20 S, IKA, Alemania) junto con 10 esferas de acero de 5 mm de diámetro en 10 ml de buffer MES (ácido etanol-sulfónico-2-[N-Morfolino]; Sigma, E.E.U.U.) estéril 0,1 M y 6,1 de pH. La suspensión se homogenizó con la ayuda del ULTRA TURRAX® Tube Drive (IKA, Alemania) que agitó las esferas de acero durante dos minutos a 6000rpm y temperatura ambiente. La suspensión de suelo generada fue inmediatamente utilizada para medir las cinéticas enzimáticas. Para realizar el ensayo se descargaron 200 mL de suspensión de suelo por pocillo con micropipeta automática de 8 canales en una placa de 96 pocillos. La turbidez propia del suelo y los compuestos fenólicos que contiene disminuyen en cierto grado la intensidad de la fluorescencia del fluoróforo 4-metilumbelliferona (4-MUB; Marx et al., 2001). El grado en que se apaga esta señal varía para los diferentes suelos, por lo tanto, se realizó una corrección para cada suelo (muestra + 4-MUB). Además, en cada placa se incluyó la mezcla de reacción de la muestra por triplicado para cada una de las concentraciones de sustrato (muestra + sustrato), un control de sustrato (sustrato + buffer) y un control de muestra (muestra + buffer). El volumen final de la mezcla de reacción en cada pocillo fue de 250 ml. La fluorescencia de los controles se restó al valor de las muestras. Como estándar se utilizó 4-MUB en concentración final de 2  $\mu$ M en el pocillo. Los sustratos 4-MUB-Fosfato, 4-MUB- $\beta$ -D-cellobiosa, 4-MUB-N-acetil- $\beta$ -D-glucosamina, 4-MUB- $\beta$ -D-glucopiranosa, y 4-MUB-sulfato (Sigma, E.E.U.U.) se disolvieron en agua estéril y las concentraciones finales en los pocillos fueron de 40  $\mu$ M.

La intensidad de la fluorescencia se leyó a 355 nm y a 460 nm de longitud de onda de excitación y de emisión, respectivamente, en el lector de fluorescencia para placas (POLARstar Omega, BMG LABTECH, Alemania). El lector fue programado para realizar 25 ciclos de lectura de 60 seg a 30 °C. Las actividades enzimáticas se calcularon como la cantidad de sustrato hidrolizado por unidad de tiempo y se expresó en nmol de 4-MUB producidos por hora y por gramo de suelo seco.

#### Carbono de la Biomasa microbiana ( $C_{mic}$ )

Para esta determinación, las muestras fueron previamente secadas por exposición al aire en un cuarto ventilado con temperatura controlada a 25 °C durante 72 h. De cada una de las 10 submuestras de cada tratamiento se colocaron 7,5 g de suelo en tubos cónicos de 50 ml, se agregaron 2,5 ml de agua destilada y se incubaron por 15 h a 30° C en oscuridad. Esto se llevó a cabo por cuadruplicado. Luego de esta incubación, dos de los tubos se fumigaron con 0,4 ml de cloroformo puro (Carlo Erba, Argentina) libre de etanol y se incubaron durante 30 min. Los dos tubos restantes, sin el agregado de cloroformo, fueron utilizados como control no fumigado. El contenido de los cuatro tubos se extrajo inmediatamente con 30 mL de sulfato de potasio 0,5 M durante 1 h en agitación a 200 rpm. Finalmente, las muestras se centrifugaron durante 15 min a 800 g (Thermo Electro Corporation, rotor R 8947) y el sobrenadante se filtró a través de papel de filtro FP0859 (Hahnemühle, German) (Vance et al., 1987).

El carbono de la biomasa microbiana fue estimado por oxidación con dicromato (Brookes y Joergensen, 2006). Los resultados se expresaron como el valor promedio respecto a la curva patrón realizada con glucosa (0,015-0,075 mg mL<sup>-1</sup>). El  $C_{mic}$  se expresó como microgramos ( $\mu$ g) de C oxidable por gramo de suelo seco calculado como la diferencia entre los valores de los tubos fumigados y no fumigados (Brookes y Joergensen, 2006).

#### Cuantificación de las fracciones de agregados

El fraccionamiento granulométrico del suelo fue hecho mediante tamizado en húmedo (Cambardella et al., 2001; Galantini et al., 2005). Brevemente, 20 g de cada submuestra de suelo previamente secado y tamizado por 2 mm, fue dispersado en tubos Falcon de 50 mL con 50 mL de agua desionizada conteniendo 10 bolitas de metal (5 mm de diámetro) para facilitar la dispersión de los agregados y reducir los posibles problemas creados por las diferencias en los contenidos de arena (Cambardella et al., 2001). Las muestras fueron sometidas a dispersión mecánica en un agitador orbital por aproximadamente 16 horas (40 rpm) para liberarlos agregados. El tamizado fue hecho con dos tamices con mallas de 63  $\mu$ m y 105  $\mu$ m de tamaño de poro de la red, hasta que el agua que salía del tamiz más pequeño era transparente a ojo desnudo. De este modo se obtuvieron tres fracciones de diferente tamaño, los macroagregados (2000-105  $\mu$ m), fracción media (105-63  $\mu$ m) y los microagregados (< 63  $\mu$ m). El líquido conteniendo la fracción < 63  $\mu$ m fue centrifugado a 2000 rpm y transferido a una placa de Petri. El material retenido en cada tamiz fue también transferido a placas de Petri de vidrio, secado a 105° C durante 24 horas para posteriormente pesarlo.

### Mediciones de las variables químicas

Las mediciones de carbono orgánico total (COT) fueron hechas por medio de combustión seca (LECO Carbon analyzer). Las mediciones de fósforo extraíble (P<sub>ext</sub>) fueron hechas por medio del método de fósforo Bray. El pH fue medido en solución acuosa 1:2,5. Estas mediciones fueron llevadas a cabo en el laboratorio del Dr. Juan Galantini, en la Universidad Nacional de Sur.

### Análisis Estadístico

Los gráficos y el análisis estadístico fueron realizados en R (R Development Core Team, 2020). Las comparaciones entre las muestras de los diferentes tratamientos fueron realizadas con el análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba Fisher's con LSD 0,5 ( $P < 0,05$ ). Cada parámetro de los CLPP determinados en diferentes condiciones de fuente de C y se realizó el ANOVA seguido por una prueba de Hostiling para cada fuente de C. Las relaciones entre tratamiento fueron visualizadas por medio del Análisis de Componentes Principales (ACP) por medio de la distancia euclídea. El análisis de correlaciones fue realizado por medio de coeficientes de correlación de Pearsons. Los gráficos radiales de las EAA fueron llevados a cabo con la normalización de las actividades enzimáticas, en la que al valor de la actividad de la actividad extracelular se le resta el promedio de todos los valores de esa actividad y posteriormente al resultado se lo dividió por el desvío estándar para todos los valores de esa actividad enzimática.

## RESULTADOS

### Análisis químicos

Se presentaron diferencias significativas entre la LC y SD para el COT siendo significativamente mayor esta última en la profundidad 0-5 cm ( $P < 0,0001$ ) y las muestras de primavera presentaron mayores valores en comparación a sus correspondiente de otoño, pero no fueron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ; Tabla 1). Cuando se analizó el P<sub>ext</sub> se observó que la SD fue significativamente mayor a la LC ( $P = 0,0003$ ), pero no hubo diferencias entre otoño y primavera. En cambio, para la profundidad de 5-10 cm no se presentaron diferencias significativas ni entre los tratamientos ni entre los muestreos temporales ( $P > 0,05$ ) ni para el COT ni para el P<sub>ext</sub> (Tabla 1).

**Tabla 1:** Parámetros físicos y químicos en los diferentes sistemas de labranza para ambas épocas de muestreo para la profundidad 0-5cm (n=10). Los valores con idéntica letra no se diferencian significativamente ( $P < 0,05$ ).

**Table 1:** Physical and chemical parameters of soil under different tillage systems for both sampling times at 0-5 cm depth (n=10). Values with identical letters do not differ significantly ( $P < 0.05$ ).

| Prof. | Estación  | Sistema de labranza | COT (%) | P <sub>ext</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | C <sub>mic</sub> (µg g <sup>-1</sup> ) | > 105 µm (%) | F. Media (%) | < 63 µm (%) | Hum.(%) |
|-------|-----------|---------------------|---------|---|--|--------------|--------------|-------------|---------|
| 0-5   | Otoño     | LC                  | 1,85 b  | 56,18 b                                 | 805,22 a                               | 6,6 c        | 28,8 a       | 64,72 a     | 10,18 b |
|       |           | SD                  | 2,39 a  | 88,64 a                                 | 675,19 ab                              | 7,99 c       | 26,27 a      | 65,75 a     | 10,56 b |
|       | Primavera | LC                  | 1,96 b  | 64,1 b                                  | 530,16 b                               | 23,72 b      | 27,62 a      | 48,66 b     | 16,21 a |
|       |           | SD                  | 2,47 a  | 81,68 a                                 | 382,86 c                               | 35,03 a      | 27,02 a      | 37,95 c     | 16,48 a |
| 5-10  | Otoño     | LC                  | 1,88 a  | 57,16 a                                 | 719,64 a                               | 16,84 b      | 29,17 a      | 53,99 a     | 16,21 b |
|       |           | SD                  | 1,89 a  | 43,62 a                                 | 725,98 a                               | 25,23 a      | 27,51 a      | 47,25 b     | 16,48 b |
|       | Primavera | LC                  | 1,85 a  | 57,94 a                                 | 195,56 b                               | 16,95 b      | 27,22 a      | 55,83 a     | 20,17 a |
|       |           | SD                  | 1,94 a  | 51,1 a                                  | 302,86 b                               | 28,54 a      | 23,63 a      | 47,83 b     | 21,21 a |

LC: labranza convencional; SD: siembra directa; COT: carbono orgánico total, P<sub>ext</sub>: fosforo extraíble; C<sub>mic</sub>: carbono de la biomasa microbiana, > 105 µm: macroagregado; F.media: fracción media de agregados; < 63 µm: microagregados; Hum: humedad gravimétrica.

LC: conventional tillage; SD: no-tillage; COT: total organic carbon, P<sub>ext</sub>: extracted phosphorus; C<sub>mic</sub>: microbial biomass carbon, > 105 µm: macroaggregates; F.media: median aggregate fraction; < 63 µm: microaggregates; Hum: gravimetric humidity.

### Análisis físico de los agregados

A nivel de agregados, se presentaron interacciones significativas entre los tratamientos y los muestreos, por lo cual se analizaron los muestreos individualmente por medio de un ANOVA (Tabla 1). En las muestras de primavera, la fracción > 105 µm (macroagregados) fue mayor en la SD que la LC para ambas profun-

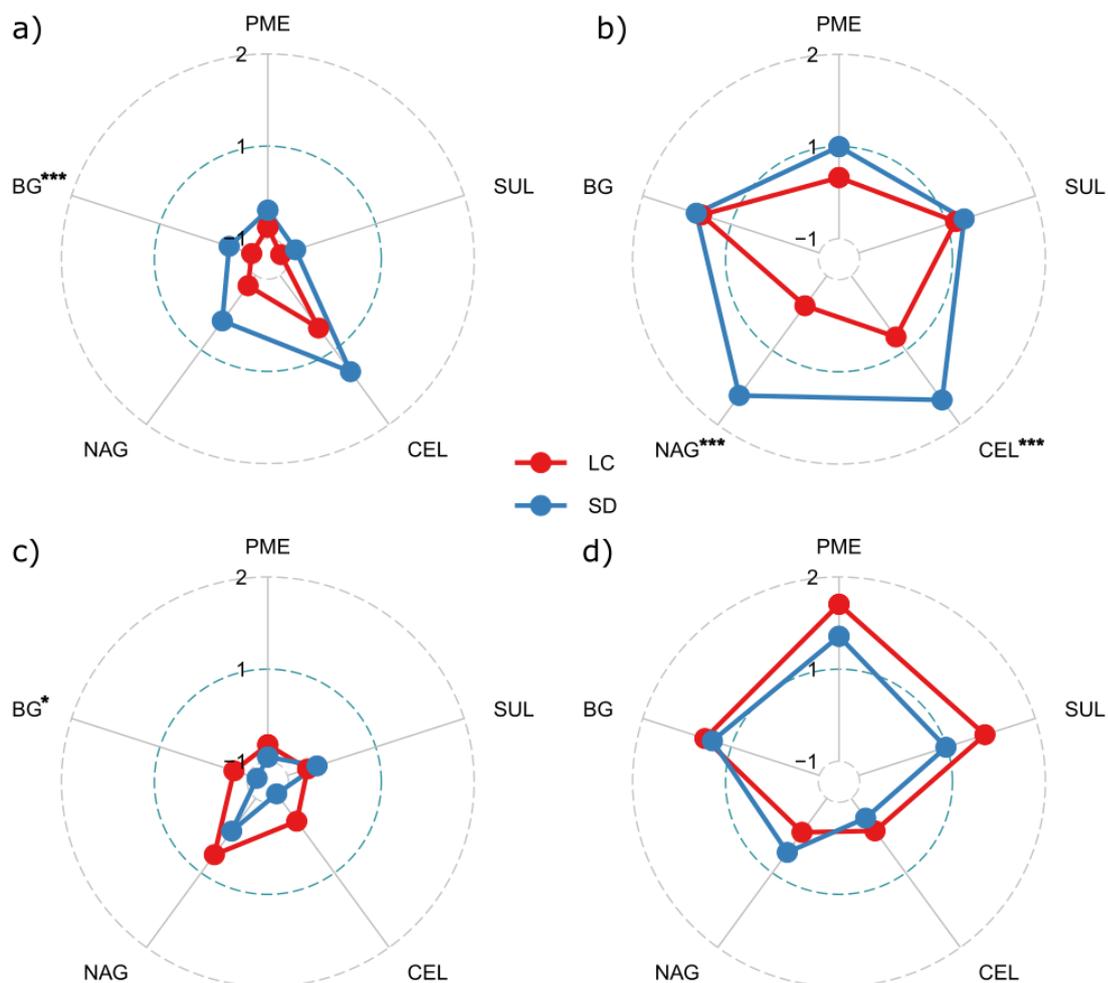
didades, pero no se encontraron diferencias significativas en las muestras de primavera ( $P < 0,0001$ ). Lo opuesto sucede con la fracción  $<63 \mu\text{m}$  (microagregados) donde la LC convencional fue mayor a la SD para ambas profundidades ( $P < 0,0001$ ). En cambio, en la fracción media no se presentaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza ( $P > 0,05$ ). En las muestras de otoño no se presentaron diferencias significativas para ninguna fracción de agregados para profundidad 0-5 cm (Tabla 1). En cambio, en la profundidad 5-10 cm, los macroagregados presentó diferencias significativas siendo mayor la SD que la LC ( $P = 0,0042$ ) y en los microagregados, la LC fue mayor a la SD ( $P = 0,0209$ ). Finalmente, la fracción media no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 1).

#### **Carbono de la Biomasa Microbiana ( $C_{\text{mic}}$ )**

La biomasa microbiana fue medida a través de la estimación de C de la biomasa microbiana ( $C_{\text{mic}}$ ). La LC presentó mayores valores de  $C_{\text{mic}}$  que la SD, siendo significativos sólo en primavera (Tabla 1). Además, las muestras de otoño presentaron mayores valores que las muestras de primavera (Tabla 1). En cambio, para la profundidad 5-10 cm observamos que no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, pero sí entre muestreos temporales. Aquí, por el contrario, la SD fue mayor a la LC para ambos muestreos, aunque las diferencias no fueron significativas (Tabla 1).

#### **Actividades Enzimáticas**

Las actividades de las enzimas BG, NAG, PME y CEL presentaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza siendo mayores todas las actividades en la SD para 0-5 cm de profundidad (Figura 1, Tabla Suplementaria 1), en cambio la LC presentó mayores actividades en la mayor profundidad siendo significativas las diferencias en PME, CEL y BG (Figura 1c y 1d). En general, se observa un incremento de hasta un 70% en la SD en comparación con la LC en 0-5 cm. Por el contrario, sucede lo opuesto para 5-10 cm donde la LC presenta un incremento de hasta un 50% en comparación con la SD (Figura 1c y 1d). Cuando analizamos el perfil fisiológico de las actividades enzimáticas vemos que para 0-5 cm, la SD presentó circunferencias de mayor tamaño que la LC (Figura 1a y 1b), por el contrario, para la profundidad 5-10 cm se observa el efecto contrario (Figura 1c y 1d). Finalmente, se presentaron diferencias significativas en los muestreos en las actividades enzimáticas de PME, SUL, NAG y BG para 0-5 cm de profundidad y en las actividades de PME, SUL, CEL, BG en la profundidad de 5-10 cm.



**Figura 1:** Perfiles enzimáticos para a) el muestreo de primavera 0-5 cm; b) el muestreo de otoño 0-5 cm; c) el muestreo de primavera 5-10 cm; d) el muestreo de otoño 5-10 cm. Los asteriscos indican las diferencias significativas para cada actividad enzimática. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ , and \*\*\*:  $P < 0.005$ . LC: labranza convencional; SD: siembra directa; PME: Fosfatasa; SUL: arilsulfatasa; CEL:  $\beta$ -cellobiohidrolasa; NAG: N-acetil-glucosaminidasa; BG:  $\beta$ -glucosidasa.

**Figure 1:** Enzymatic profiles a) spring sampling at 0-5 cm depth; b) autumn sampling at 0-5 cm depth; c) spring sampling at 5-10 cm depth; d) autumn sampling at 5-10 cm depth. Asterisks indicate the significant differences for each enzymatic activity. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ , and \*\*\*:  $P < 0.005$ . LC: conventional tillage; SD: no-tillage; PME: Fosfatase; SUL: arilsulfatase; CEL:  $\beta$ -cellobiohidrolase; NAG: N-acetil-glucosaminidase; BG:  $\beta$ -glucosidase.

#### Análisis de los Perfiles Fisiológicos a Nivel de Comunidades (CLPP).

Cuando analizamos individualmente los parámetros que conforman el CLPP para la profundidad 0-5 cm durante la primavera, los Fmax fueron levemente mayores en SD en comparación con la LC sin presentar diferencias significativas. Por el contrario, en otoño, la LC presentó valores significativamente mayores que la SD (Tabla 2). Los TMR para la misma profundidad mostraron diferencias significativas entre los tratamientos sin diferenciarse los sistemas de labranza. Para la profundidad 5-10 cm observamos que el Fmax de la respiración basal mostró diferencias estacionales ( $P < 0,0001$ ) y el Fmax del ácido cumárico mostró diferencias significativas entre los sistemas de labranza ( $P = 0,0001$ ; Tabla 2). Finalmente, los Fmax restantes no mostraron diferencias significativas entre tratamientos o época. Cuando analizamos los TMR observamos se presentaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza para los cuatro indicadores (Tabla 2).

**Tabla 2:** Parámetros del perfil fisiológico a nivel de comunidades (CLPP) en los diferentes sistemas de labranza para ambas épocas de muestreo. Los valores con idéntica letra no se diferencian significativamente ( $P < 0,05$ ).

**Table 2:** Community level physiological profile (CLPP) parameters under different tillage systems for both sampling seasons. Values with identical letters do not differ significantly ( $P < 0.05$ ).

| Prof. | Estación  | Sistema de labranza | Fmax   |         |          | TMR     |         |         |          |         |
|-------|-----------|---------------------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|
|       |           |                     | RB     | Ac. Cum | Ac. Prop | Ac. Vai | RB      | Ac. Cum | Ac. Prop | Ac. Vai |
| 0-5   | Primavera | LC                  | 2,72 b | 2,64 b  | 2,54 b   | 2,6 c   | 2,04 ab | 1,79 b  | 1,75 b   | 1,92 b  |
|       |           | SD                  | 2,76 b | 2,76 b  | 2,58 b   | 2,73 bc | 1,83 a  | 1,83 b  | 1,75 b   | 1,92 b  |
|       | Otoño     | LC                  | 3,58 a | 3,58 a  | 2,97 a   | 3,63a   | 2,33 b  | 2,21 a  | 2,35 a   | 2,36 a  |
|       |           | SD                  | 2,96 b | 2,77 b  | 2,57 b   | 3,12 b  | 2,31 b  | 2,49 a  | 2,36 a   | 2,46 a  |
| 5-10  | Primavera | LC                  | 1,45 b | 2,19 ab | 2,11 a   | 1,98 a  | 2,29 b  | 2,17 b  | 2,13 b   | 2,5 ab  |
|       |           | SD                  | 1,28 b | 1,77 c  | 1,98 a   | 1,79 a  | 3,54 a  | 3:00 AM | 3,29 a   | 3,13 a  |
|       | Otoño     | LC                  | 2,04 a | 2,41 a  | 2,16 a   | 2,21 a  | 2,37 b  | 2,08 b  | 2,27 b   | 2,25 b  |
|       |           | SD                  | 1,89 a | 2,06 b  | 1,95 a   | 2,02 a  | 3,27 ab | 2,47 ab | 3,25 a   | 2,75 ab |

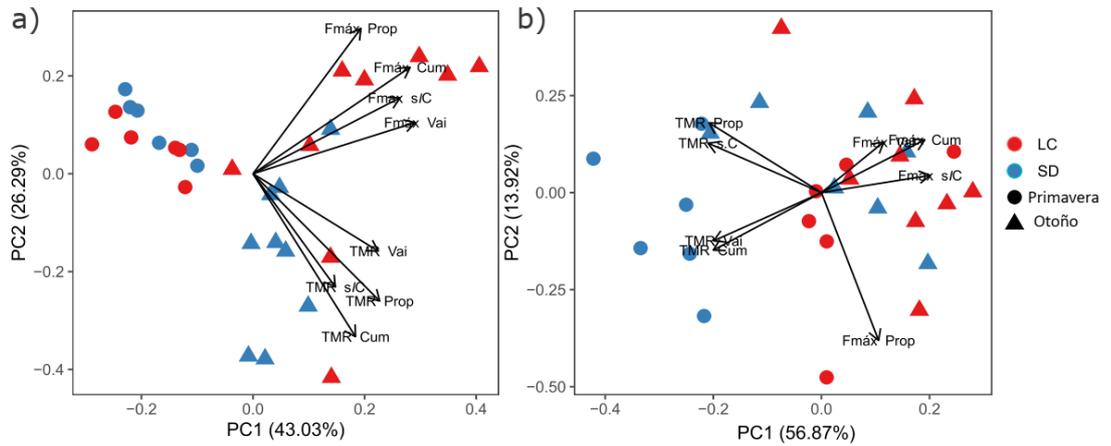
LC: labranza convencional; SD: siembra directa, Fmax: fluorescencia máxima; TMR: tiempo mínimo de respuesta; RB: respiración basal; Ac. Cum: ácido cumárico; Ac. Prop: ácido propiónico; Ac. Vai: ácido vainillíco.

LC: conventional tillage; SD: no-tillage; Fmax: maximal fluorescence; TMR: minimal time for response; RB: basal respiration; Ac. Cum = coumaric acid; Ac. Prop: propionic acid; Ac. Vai: vanillic acid.

El ACP a partir de los CLPP muestra que, para la profundidad 0-5 cm, el PC1 explicó el 43,03% de la varianza y el PC2 el 26,20% (Figura 2a). Se puede observar una diferencia estacional por sobre la diferencia entre los sistemas de labranza (Figura 2a), donde las muestras de otoño se orientaron hacia los valores positivos del PC1. Cuando observamos que los sistemas de labranza, estos se separaron a lo largo del PC2. Ambos tipos de parámetros se asociaron con las muestras de otoño, mientras que el Fmax se orientaron con las muestras de LC, los parámetros de TMR se asociaron con la SD (Figura 2b). En cambio, el ACP basados en el CLLP para las muestras de 5-10 cm de profundidad, el PC1 explicó el 56,87% de la varianza y el PC2 el 13,92 % (Figura 2b). Las muestras se separaron a lo largo del PC1 por sistema de labranza y por estación a lo largo del PC2, los parámetros de Fmax se asociaron con las muestras de LC principalmente de otoño mientras que los TMR de Prop y sin C adicionado se asociaron las muestras de SD de otoño mientras que los otros dos parámetros de TMR (Vai y Cum) se asociaron con las muestras de SD de primavera (Figura 2b).

**Figura 2:** Análisis de Componentes Principales (PC) basado en el perfil fisiológico a nivel de comunidades (CLPP) para a) 0-5 cm y b) 5-10 cm de profundidad (n=10 para 0-5 cm y n=6 para 5-10 cm de profundidad).

**Figure 2:** Principal Component Analysis (PC) based on community level physiological profile (CLPP) for samples taken at a) 0-5 cm depth (n = 10) and b) 5-10 cm depth (n = 6).



LC: labranza convencional; SD: siembra directa, Fmax: fluorescencia máxima; TMR: tiempo mínimo de respuesta; RB: respiración basal; Ac. Cum: ácido cumárico; Ac. Prop: ácido propiónico; Ac. Vai: ácido vainílico.

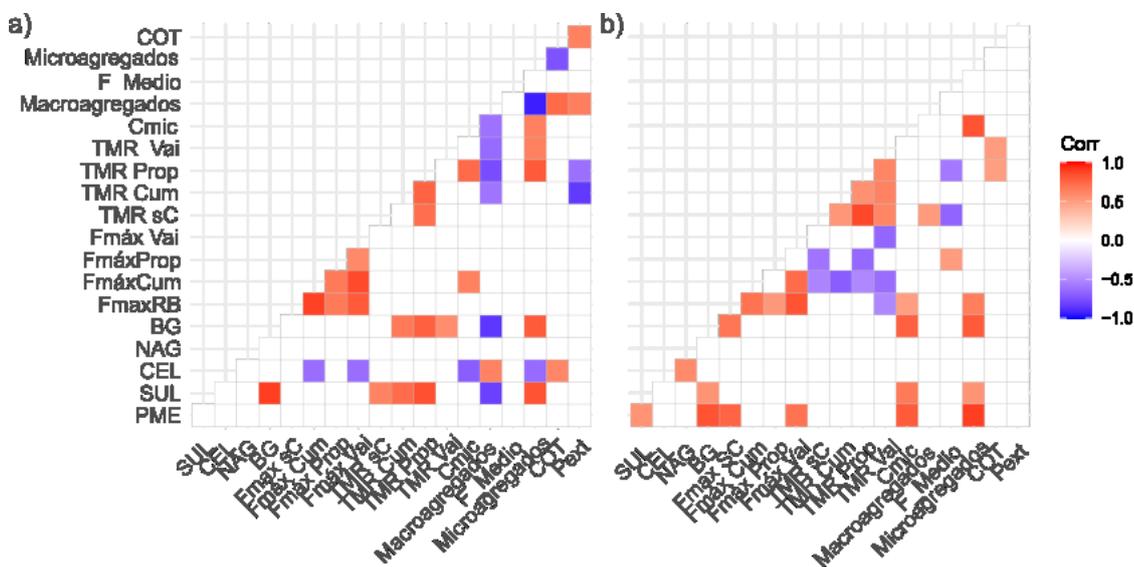
LC: conventional tillage; SD: no-tillage; Fmax: maximal fluorescence; TMR: minimal time for response; RB: basal respiration; Ac. Cum: coumaric acid; Ac. Prop: propionic acid; Ac. Vai: vanillic acid.

#### Correlaciones entre las distintas variables

Cuando analizamos las correlaciones entre los indicadores para la profundidad 0-5 cm observamos que el  $C_{mic}$  correlaciona de forma positiva con las actividades enzimáticas de BG, PME y SUL ( $r = 0.46, 0.34$  y  $0.41$ , respectivamente), también lo hace de la misma forma con los microagregados ( $r = 0.34$ ) y de forma negativa con los macroagregados ( $r = -0.47$ ). El  $COT$  y el  $P_{ext}$  correlacionan de forma positiva entre sí ( $r = 0.64$ ) y con los macroagregados ( $r = 0.74$  y  $0.65$ , respectivamente). SUL y BG correlacionan de forma positiva con los microagregados ( $r = 0.82$  y  $0.80$ , respectivamente) y de forma negativa con los macroagregados ( $r = -0.82$  y  $-0.85$ , respectivamente), lo opuesto sucede con la actividad de la CEL (micro:  $r = -0.63$  y macro:  $r = 0.64$ ). Además, encontramos que la humedad gravimétrica correlaciona con varios de los parámetros (Figura 3a). Para la profundidad 5-10 cm observamos que el  $C_{mic}$  correlaciona de forma positiva con las actividades enzimáticas de BG, PME y SUL ( $r = 0.78, 0.79$  y  $0.68$ , respectivamente). A su vez las actividades enzimáticas solo correlacionan con los microagregados de manera positiva (BG:  $r = 0.79$ , SUL:  $r = 0.54$  y PME:  $r = 0.90$ ) (Figura 3b).

**Figura 3:** Heatmap de correlaciones de Pearson en los diferentes sistemas de labranza para ambas épocas de muestreo para a) 0-5 cm y b) 5-10 cm de profundidad.

**Figure 3:** Pearson's correlation heatmap under different tillage systems for both seasons at a) 0-5 cm depth and b) 5-10 cm depth.



Fmax: fluorescencia máxima; TMR: tiempo mínimo de respuesta; RB: respiración basal; Ac. Cum: ácido cumárico; Ac. Prop: ácido propiónico; Ac. Vai: ácido vainílico; COT: carbono orgánico total, P<sub>ext</sub>: fósforo extraíble; Cmic: carbono de la biomasa microbiana, > 105: fracción grande de agregados; F.media: fracción media de agregados; < 63: fracción chica de agregados; PME: fosfatasa; SUL: arilsulfatasa; CEL: β-cellobiohidrolasa; NAG: N-acetil-glucosaminidasa; BG: β-glucosidasa.

Fmax: maximal fluorescence; TMR: minimal time for response; RB: basal respiration; Ac. Cum: coumaric acid; Ac. Prop: propionic acid; Ac. Vai: vanillic acid; COT: total organic carbon, P<sub>ext</sub>: extractable phosphorus; C<sub>mic</sub>: microbial biomass carbon, > 105: big aggregate fraction; F.media: median aggregate fraction; <63: small aggregate fraction; PME: phosphatase; SUL: arylsulfatase; CEL: β-cellobiohydrolase; NAG: N-acetyl-glucosaminidase; BG: β-glucosidase.

## DISCUSIÓN

Los sistemas de labranza, como la LC o la SD, modifican las características físicas y químicas del suelo, que como consecuencia afectan las comunidades microbianas y sus propiedades biológicas como son las actividades enzimáticas (Gabbarini et al., 2021). El efecto positivo de la SD en las propiedades del suelo ha sido sugerido en varios estudios previamente (Alvear et al., 2005; Kandeler et al., 1999; Zuber et al., 2016), principalmente basado en la formación y estabilización de la MO dentro de los micro- y macro agregados (Hussain et al., 2021), por el incremento de la cantidad de residuos de los cultivos que quedan en superficie (Wu et al., 2021). Varios autores han observado previamente que la SD presenta mayores valores de COT en comparación con la LC (Díaz-Zorita et al., 2002; Francaviglia et al., 2023; Ken et al., 2022) así como también en el P<sub>ext</sub> para la profundidad de 0-5 cm (Rodríguez et al., 2016). La correlación positiva entre la cantidad de COT y P<sub>ext</sub> para la profundidad de 0-5 cm puede estar relacionado con que una gran proporción de P<sub>ext</sub> se encuentra secuestrado en la materia orgánica (Sinsabaugh et al., 2008; Melero et al., 2009). Por otro lado, que la C<sub>mic</sub> sea más abundante en la LC está relacionado con la incorporación de los residuos de los cultivos en el suelo como efecto de la labranza (Alvarez et al., 1995), relativizando el significado del C<sub>mic</sub> respecto de ser un estimador de la biomasa microbiana y a su vez se asocia también con una menor cantidad de agregados de mayor tamaño que protegen el carbono de ser mineralizado por los microorganismos (Hussain et al., 2021). Además, otro aspecto que puede considerarse es la concentración de O<sub>2</sub> disuelto en el suelo, la cual es menor en SD y afecta la tasa de descomposición, así como también la distribución de los microbios aerobios y anaerobios (Rodríguez et al., 2016), sin embargo, esta consideración no se corresponde con las variaciones de actividades enzimática y los parámetros del CLPP. No se presentaron correlaciones entre los valores de COT y C<sub>mic</sub>, a diferencia de lo que se observa en otros ensayos donde sí existe esta correlación. Algunos autores sugieren que esta correlación podría ser más propia de la biomasa microbiana con el carbono activo que con el COT en suelos arenosos (Reeve et al., 2010). Posiblemente, esta correlación se manifieste principalmente en suelos arcillosos, donde hay típicamente mayores concentraciones de biomasa microbiana respecto a los suelos arenosos, como los aquí estudiados (Franzluebber et al., 1996).

Nuestros resultados evidencian que el Cmic como estimador de biomasa microbiana en suelos arenosos debería ser revisado y convalidados.

Se ha reportado de manera reiterada que la mayoría de las enzimas hidrolíticas se incrementan cuando se reduce la intensidad de la labranza mejorando el contenido de materia orgánica y la biomasa microbiana (Francaviglia et al., 2023; Lagomarsino et al., 2009). La presencia de residuos de cultivos previos puede incrementar la actividad de la BG (Allison y Vitousek, 2005), lo cual se ve altamente relacionado con la SD para los primeros 0-5 cm debido a los residuos que se encuentran en superficie. En cambio, en la LC se daría un efecto de redistribución de las enzimas en todo el perfil del suelo similar a que se menciona cuando se habla de las variables químicas. Tanto la BG como la CEL actúan como fuerte reflector de la mineralización del carbono (Kong et al., 2005). La NAG juega un rol fundamental en la degradación de la quitina, un compuesto abundante en N en todos los suelos, y otros enlaces  $\beta$ -1,4-unidos a polímeros de glucosamina (Sinsabaugh et al., 2008). La presencia de quitina se origina por la presencia de hongos y de insectos en el suelo, ya que es el componente principal de la pared celular de hongos y del citoesqueleto de insectos. Tanto los hongos, como los insectos aumentan en los suelos agrícolas manejados en SD en comparación con la LC (Bedano y Domínguez, 2016; Frey et al., 2006). La actividad de esta enzima es importante porque participa en el proceso donde la quitina es convertida en amino azúcares, lo cuales son una de las principales fuentes de N mineralizables en los suelos (Ekenler y Tabatabai, 2002). Altas concentraciones de N en la superficie de los suelos bajo SD en comparación con dos tipos de labranza tradicional, como son labranza con rastra y con disco, han sido asociadas con mayores actividades de NAG (Ekenler y Tabatabai, 2002; Qin et al., 2010) y han correlacionado de manera positiva con biomarcadores fúngicos basados en ácido grasos fosfolípidos. En nuestros ensayos carecemos de datos de N, pero mayores valores en la SD que en la LC han sido presentados en estudios previos en los mismos suelos (Galantini et al., 2006; Galantini et al., 2013). La PME hidroliza fosfomonoésteres, y en algunos casos fosfodiésteres, liberando fosfato (Sinsabaugh et al., 2008). Los suelos con cobertura natural muestran mayores valores de actividad fosfatasa, por lo cual se esperaría mayores valores en la SD. Esto ocurre posiblemente debido a que fosfatasa es mayormente secretada por las raíces de las plantas, y hongos micorrícicos asociados (Cofre et al., 2020). Cuando se analiza el conjunto de las actividades enzimáticas, como un perfil fisiológico, se observan comportamientos integrales de los suelos y se permite ver los efectos de los tratamientos agrícolas de manera rápida y concisa.

Se cree que los CLPP están marcados principalmente por microorganismos copiotróficos, ya que estos consumen rápidamente los sustratos agregados en este tipo de ensayos (Lladó y Baldrian, 2017). Estudios metagenómicos comparando suelos con SD o LC muestran que las bacterias copiotróficas, como los *Firmicutes* y las *Betaproteobacterias*, son más abundantes en los suelos con LC en comparación con aquellos en SD (Dai et al., 2021; Gabbarini et al., 2021). Por otro lado, estudios similares llevados cabo con las comunidades hongos mostraron que la SD favorece los hongos simbióticos, como las micorrizas (Wang et al., 2021). Por otro lado, la LC favorece la proliferación de hongos saprofitos (Orrù et al., 2021). Lo que conlleva a que la descomposición y mineralización estén aceleradas, resultando en un incremento en la actividad microbiana (Souza et al., 2013). Por lo cual, la LC aumenta el consumo de oxígeno de las comunidades microbianas, principalmente cuando se agrega fuentes de C y esto es consistente con estudios previos que muestran una promoción general de la mineralización de la materia orgánica (Gómez et al., 2012; Pikul et al., 2001), como consecuencia del aumento de la aireación del suelo y la disminución de los macroagregados que protegen la MO.

Las propiedades del suelo son también influenciadas de forma directa por otros factores como vegetación presente al momento del muestreo y las condiciones climáticas (Acosta-Martínez et al., 2017; Grzyb et al., 2020). Por lo cual, la diferencia entre los muestreos viene dada principalmente porque el muestreo de primavera posterior a la siembra y el segundo muestreo fue previo a la cosecha, por lo cual es posible ver el efecto de la planta en los indicadores aquí analizados. Además de los cambios en la humedad del suelo también juegan un rol, ya que el incremento de la humedad sustenta un aumento en la biomasa microbiana y en las actividades enzimáticas (Bhandari et al., 2018; Zeglin et al., 2013).

Cuando se analizaron las correlaciones en la capa superior del suelo, la biomasa microbiana ( $C_{mic}$ ) presentó una correlación positiva con los microagregados ( $< 63 \mu m$ ), y una correlación negativa con los macroagregados ( $> 105 \mu m$ ), estableciendo que los microorganismos se encuentran presentes principalmente en la fracción de menor tamaño (Frene et al., 2017; Neumann et al., 2013). Sin embargo, la dinámica de formación de agregados sugiere que los agregados más grandes se forman a partir de agregados más

pequeños, lo cual plantea nuevamente una contradicción de la relación de  $C_{mic}$  como estimador de la biomasa microbiana. La actividad de las enzimas BG, NAG, PME y SUL se correlacionó de manera negativa con los macroagregados y de manera positiva con la fracción de menor tamaño. Por otro lado, la CEL y la NAG se correlacionaron con el COT de manera positiva. Al igual que los parámetros anteriores, los  $F_{max}$  con fuentes de C agregadas se correlacionaron de manera negativa con los macroagregados y de manera positiva con los microagregados, pero no se correlacionaron con el COT. Lo cual muestra que la mayor cantidad de la biomasa microbiana que respira o esta activa, se encuentra en los microagregados al igual que en los primeros 5 cm de suelo (Frene et al., 2017). Finalmente, cuando se correlacionaron las actividades enzimáticas de BG, NAG y PME con los  $F_{max}$  (RB, Cum y Prop), vemos que lo hacen de manera positiva. Lo cual agrega que la actividad enzimática se colocaliza en conjunto con la biomasa microbiana activa. En la profundidad correspondiente a 5-10 cm, las correlaciones entre  $F_{max}$  y las actividades enzimáticas de BG, PME y SUL no variaron respecto a la profundidad 0-5 cm, se correlacionan de manera positiva. El COT se correlacionó de manera positiva nuevamente con CEL y NAG. Por otro lado, las correlaciones de las actividades enzimáticas y los  $F_{max}$  no mostraron una relación significativa con las fracciones de agregados de menor o mayor tamaño, sino con los agregados de tamaño intermedio. Esta diferencia entre 0-5 y 5-10 cm de profundidad puede estar evidenciando el aporte significativo de los rastrojos a la actividad microbiana y enzimática en los primeros 5 cm de suelo y una distribución diferente a una mayor profundidad.

La "contradicción aparente" entre  $C_{mic}$  y actividad biológica surge de que se observa el  $C_{mic}$  no explica el aumento de actividad biológica en general. El  $C_{mic}$  es una medida que depende del estado de agregación del suelo, por lo cual suelos con mayor cantidad de macroagregados presenta menores niveles de biomasa microbiana como es el caso de la SD. Nosotros creemos que este resultado muestra las limitaciones del método en cuanto a la dependencia de la extracción clorofórmica en función del estado de agregación, cuanto menor sea la agregación del suelo, como en el caso de la LC, menos protegida está la biomasa microbiana para ser lisada por el cloroformo y liberar así mayor cantidad de C microbiano.

En conclusión, el tipo de sistema de labranza influencia la actividad microbiana, y enzimas del suelo a través de los cambios en la cantidad y calidad del aporte de los residuos vegetales, y modifica la estructura física, principalmente en la estabilización de los macro- y micro agregados. Sin embargo, no queda tan claro a partir de estos resultados la relación de la actividad biológica con la biomasa microbiana estimada por  $C_{mic}$ . Adicionalmente, observamos que el momento estacional del muestreo modifica la actividad biológica que se mide en el suelo, probable consecuencia del estado del cultivo como así también de la temperatura media en el suelo en el período de muestreo. Finalmente, la LC mostró que la actividad enzimática y la respiración del suelo esta homogéneamente distribuida en los primeros 20 cm de suelo en comparación con la SD que muestra una actividad mayor en la superficie que disminuye rápidamente con la profundidad. Nuestros resultados muestran que es necesario llevar a cabo más estudios donde se pueda comprender todos los aspectos involucrados en el funcionamiento del suelo. Por lo cual, es necesario continuar con los estudios sobre los sistemas de labranza integrando parámetros adicionales a los aquí utilizados para comprender mejor como se producen los cambios en los sistemas agrícolas, y específicamente en los sistemas de labranza.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Martínez, V., Cruz, L., Sotomayor-Ramírez, D., y Pérez-Alegría, L. (2007). Enzyme activities are affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 35(1), 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.05.012>
- Afshar, R. K., Cabot, P., Ippolito, J. A., Dekamin, M., Reed, B., Doyle, H., y Fry, J. (2022). Corn productivity and soil characteristic alterations following the transition from conventional to conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 220, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105351>
- Albertengo, J., Belloso, C., Giraudo, M. B., Peiretti, R., Permingeat, H., y Wall, L. (2014). Conservation agriculture in Argentina. In *Conservation agriculture: Global Prospects and Challenges* (pp. 352-374). Wallingford UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780642598.0352>
- Allison, S. D., y Vitousek, P. M. (2005). Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), 937-944. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.09.014>
- Alvear, M., Rosas, A., Rouanet, J. L., y Borie, F. (2005). Effects of three soil tillage systems on some biological activities in an Ultisol from southern Chile. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.06.002>
- Bhandari, K. B., West, C. P., Acosta-Martínez, V., Cotton, J., y Cano, A. (2018). Soil health indicators as affected by diverse forage species and mixtures in semi-arid pastures. *Applied Soil Ecology*, 132, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.09.002>
- Bedano, J. C., y Domínguez, A. (2016). Large-scale agricultural management and soil meso-and macrofauna conservation in the Argentine Pampas. *Sustainability*, 8(7), 653. <https://doi.org/10.3390/su8070653>

- Brookes, P. C., y Joergensen, R. G. (2006). Microbial Biomass Measurements by Fumigation–Extraction. *Methods for Assessing Soil Quality*, 77. <https://doi.org/10.1079/9780851990989.0000>
- Cambardella, C. A., Gajda, A. M., Doran, J. W., Wienhold, B. J., Kettler, T. A., y Lal, R. (2001). Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. *Assessment Methods for Soil Carbon*, 349-359.
- Chalise, D., Kumar, L., Sharma, R., y Kristiansen, P. (2020). Assessing the impacts of tillage and mulch on soil erosion and corn yield. *Agronomy*, 10(1), 63. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010063>
- Cofre, N., Becerra, A. G., Marro, N., Dominguez, L., y Urcelay, C. (2020). Soybean growth and foliar phosphorus concentration mediated by arbuscular mycorrhizal fungi from soils under different no-till cropping systems. *Rhizosphere*, 16, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100254>
- Custodio, V., Gonin, M., Stabl, G., Bakhoun, N., Oliveira, M. M., Gutjahr, C., y Castrillo, G. (2022). Sculpting the soil microbiota. *The Plant Journal*, 109(3), 508-522. <https://doi.org/10.1111/tpj.15568>
- Dai, Z., Hu, J., Fan, J., Fu, W., Wang, H., y Hao, M. (2021). No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 309, 107288. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107288>
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A., y Grove, J. H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00274-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00274-4)
- Ekenler, M., y Tabatabai, M. (2002).  $\beta$ -Glucosaminidase activity of soils: effect of cropping systems and its relationship to nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils*, 36, 367-376. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0541-x>
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579-590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Francaviglia, R., Almagro, M., y Vicente-Vicente, J. L. (2023). Conservation agriculture and soil organic carbon: Principles, processes, practices and policy options. *Soil Systems*, 7(1), 17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>
- Franzuebbers, A. J., y Hons, F. M. (1996). Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil and Tillage Research*, 39(3-4), 229-239. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01056-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01056-2)
- Frene, J. P., Gabbarini, L. A., y Wall, L. G. (2018). Efectos de la labranza en la estructura y la actividad biológica a nivel de los microagregados del suelo. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 50-61. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v47i2.56135>
- Frene, J. P., Gabbarini, L. A., y Wall, L. G. (2019). Soil physiology discriminates between no-till agricultural soils with different crop systems in the winter season. *Soil Use and Management*, 00:1–10. <https://doi.org/10.1111/sum.12568>
- Frey, B., Stemmer, M., Widmer, F., Luster, J., y Sperisen, C. (2006). Microbial activity and community structure of soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1745-1756. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.11.032>
- Gabbarini, L. A., Figuerola, E., Frene, J. P., Robledo, N. B., Ibarbalz, F. M., Babin, D., y Wall, L. G. (2021). Impacts of switching tillage to no-tillage and vice versa on soil structure, enzyme activities, and prokaryotic community profiles in Argentinean semi-arid soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 97(4), fiab025. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab025>
- Galantini, J. A., Suñer, L., y Krüger, H. (2005). Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 34(2), 13-31. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86434202>
- Galantini, J., y Rosell, R. (2006). Long-term fertilization affects soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.032>
- Galantini, J. A., Duval, M., Iglesias, J., y Martínez, J. M. (2013). Efectos de largo plazo de la siembra directa en el SO Bonaerense. Dinámica y balance de carbono. *Boletín electrónico Cerzos, (UNSCerzos)*. AAPRESID, Bahía Blanca, 27-32.
- Galantini J., Keine C. (2013). Efectos de largo plazo de la siembra directa en el SO Bonaerense: Producción de los cultivos y balance de nutrientes. *Revista AAPRESID* 2013.
- Ge, G., Li, Z., Fan, F., Chu, G., Hou, Z., y Liang, Y. (2010). Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Plant and Soil*, 326, 31-44. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0186-8>
- Grandy, A. S., Robertson, G. P., y Thelen, K. D. (2006). Do productivity and environmental trade-offs justify periodically cultivating no-till cropping systems? *Agronomy Journal*, 98(6), 1377-1383. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0137>
- Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., y Niewiadomska, A. (2020). Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. *Agronomy*, 10(12), 1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
- Hussain, S., Hussain, S., Guo, R., Sarwar, M., Ren, X., Krstic, D., ... y El-Esawi, M. A. (2021). Carbon sequestration to avoid soil degradation: A review on the role of conservation tillage. *Plants*, 10(10), 2001. <https://doi.org/10.3390/plants10102001>
- Kan, Z. R., Liu, W. X., Liu, W. S., Lal, R., Dang, Y. P., Zhao, X., y Zhang, H. L. (2022). Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective. *Global Change Biology*, 28(3), 693-710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15968>
- Kandeler, E., Tschirko, D., y Spiegel, H. (1999). Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and Fertility of Soils*, 28, 343-351. <https://doi.org/10.1007/s003740050502>

- Lladó, S., y Baldrian, P. (2017). Community-level physiological profiling analyses show potential to identify the copiotrophic bacteria present in soil environments. *PLoS One*, 12(2), e0171638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171638>
- Lagamarsino, A., Grego, S., Marhan, S., Moscatelli, M. C., y Kandeler, E. (2009). Soil management modifies micro-scale abundance and function of soil microorganisms in a Mediterranean ecosystem. *European Journal of Soil Science*, 60(1), 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01113.x>
- Magdoff, F., y Van Es, H. (2021). Building Soils for Better Crops: Ecological management for healthy soils. *Sustainable Agriculture Research and Education Program*. <http://hdl.handle.net/1903/29524>
- Martínez, J.M., Galantini J.A., Duval M.E., López F.M. (2017). Tillage effects on labile pools of soil organic nitrogen in a semi-humid climate of Argentina: a long-term field study. *Soil Tillage Res* 169:71–80.
- Marx, M. C., Wood, M., y Jarvis, S. C. (2001). A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12-13), 1633-1640. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00079-7)
- McLamore, E. S., Garland, J. L., Mackowiak, C., Desaunay, A., Garland, N., Chaturvedi, P., y Ullman, J. L. (2013). Development and validation of an open-source O2-sensitive gel for physiological profiling of soil microbial communities. *Journal of Microbiological Methods*, 96, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2013.10.016>
- Melero, S., López-Garrido, R., Murillo, J. M., y Moreno, F. (2009). Conservation tillage: Short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.001>
- Neumann, D., Heuer, A., Hemkemeyer, M., Martens, R., y Tebbe, C. C. (2013). Response of microbial communities to long-term fertilization depends on their microhabitat. *FEMS Microbiology Ecology*, 86(1), 71-84. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12092>
- Pikul Jr, J. L., Carpenter-Boggs, L., Vigil, M., Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J., y Riedell, W. E. (2001). Crop yield and soil condition under ridge and chisel-plow tillage in the northern Corn Belt, USA. *Soil and Tillage Research*, 60(1-2), 21-33. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00174-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00174-X)
- Qin, S., Hu, C., He, X., Dong, W., Cui, J., y Wang, Y. (2010). Soil organic carbon, nutrients and relevant enzyme activities in particle-size fractions under conservation versus traditional agricultural management. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.03.007>
- Orrù, L., Canfora, L., Trinchera, A., Migliore, M., Pennelli, B., Marcucci, A., y Pinzari, F. (2021). How tillage and crop rotation change the distribution pattern of fungi. *Frontiers in Microbiology*, 12, 634325. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.634325>
- R Development Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing.
- Raper, R. L., Reeves, D. W., Burmester, C. H., y Schwab, E. B. (2000). Tillage depth, tillage timing, and cover crop effects on cotton yield, soil strength, and tillage energy requirements. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(4), 379-385. <https://doi.org/10.13031/2013.5363>
- Reeve, J. R., Schadt, C. W., Carpenter-Boggs, L., Kang, S., Zhou, J., y Reganold, J. P. (2010). Effects of soil type and farm management on soil ecological functional genes and microbial activities. *The ISME Journal*, 4(9), 1099-1107. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.42>
- Rodrigues, M., Pavinato, P. S., Withers, P. J. A., Teles, A. P. B., y Herrera, W. F. B. (2016). Legacy phosphorus and no-tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of the Total Environment*, 542, 1050-1061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>
- Sinsabaugh, R. L., Lauber, C. L., Weintraub, M. N., Ahmed, B., Allison, S. D., Crenshaw, C., ... y Zeglin, L. H. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, 11(11), 1252-1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- Sun, R., Li, W., Dong, W., Tian, Y., Hu, C., y Liu, B. (2018). Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 9, 699. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00699>
- Truong, C., Gabbarini, L.A., Corrales, A., Mujic, A.B., Escobar, J.M., Moretto, A., y Smith, M.E. (2019). Ectomycorrhizal fungi and soil enzymes exhibit contrasting patterns along elevation gradients in southern Patagonia. *New Phytologist*. 222(4), 1936–1950. <https://doi.org/10.1111/nph.15714>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., y Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Wall, L. G., Gabbarini, L. A., Ferrari, A. E., Frene, J. P., Covelli, J., Reyna, D., y Robledo, N. B. (2019). Changes of paradigms in agriculture soil microbiology and new challenges in microbial ecology. *Acta Oecologica*, 95, 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.02.001>
- Wang, Q., Liang, A., Chen, X., Zhang, S., Zhang, Y., McLaughlin, N. B., ... & Jia, S. (2021). The impact of cropping system, tillage and season on shaping soil fungal community in a long-term field trial. *European Journal of Soil Biology*, 102, 103253. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103253>
- Wu, G., Chen, Z., Jiang, N., Jiang, H., y Chen, L. (2021). Effects of long-term no-tillage with different residue application rates on soil nitrogen cycling. *Soil and Tillage Research*, 212, 105044. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105044>
- Zeglin, L. H., Bottomley, P. J., Jumpponen, A., Rice, C. W., Arango, M., Lindsley, A., ... y Myrold, D. D. (2013). Altered precipitation regime affects the function and composition of soil microbial communities on multiple time scales. *Ecology*, 94(10), 2334-2345. <https://doi.org/10.1890/12-2018.1>
- Zuber, S. M., y Villamil, M. B. (2016). Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.011>

*Tabla Suplementaria 1:* actividad enzimática en los diferentes sistemas de labranza para ambas épocas de muestreo (n = 10). Los valores con idéntica letra no se diferencian significativamente ( $P < 0,05$ ).

*Supplemental Table 1:* Enzymatic activity in the different tillage systems for both seasons (n = 10). Values with the same letter do not differ significantly ( $P < 0.05$ ).

| Profundad | Estación  | Tratamiento | PME      | SUL    | CEL     | NAG     | BG      |
|-----------|-----------|-------------|----------|--------|---------|---------|---------|
| 0-5       | Primavera | LC          | 48,31 b  | 0,65 b | 6,04 bc | 4,94 c  | 22,89 c |
|           |           | SD          | 62,25 b  | 0,8 b  | 7,17 ab | 6,54 b  | 34,35 b |
|           | Otoño     | LC          | 90,29 a  | 1,86 a | 5,65 c  | 6,02 bc | 84,49 a |
|           |           | SD          | 110,71 a | 2,01 a | 8,05 a  | 10,39 a | 87,14 a |
| 5-10      | Primavera | LC          | 52,79 c  | 0,96 b | 4,18 a  | 7,03 a  | 31,88 b |
|           |           | SD          | 42,72 c  | 1,07 b | 3,08 b  | 5,96 a  | 20,22 c |
|           | Otoño     | LC          | 167,99 a | 2,2 a  | 4,58 a  | 6,01 a  | 82,76 a |
|           |           | SD          | 141,73 b | 1,75 a | 4,06 a  | 6,93 a  | 78,99 a |

LC = labranza convencional; SD = Siembra directa; PME = Fosfatasa; SUL = arilsulfatasa; CEL =  $\beta$ -cellobiohidrolasa; NAG = N-acetil-glucosaminidasa; BG =  $\beta$ -glucosidasa.

LC = conventional tillage; SD = no-tillage; PME = Fosfatase; SUL = arilsulfatase; CEL =  $\beta$ -cellobiohidrolase; NAG = N-acetil-glucosaminidase; BG =  $\beta$ -glucosidase.