

CARBONO ORGÁNICO MINERALIZADO EN PERÍODOS CORTOS DE INCUBACIÓN AERÓBICA COMO INDICADOR DE SALUD EDÁFICA

Santiago Néstor Tourn^{1,2}; Cecilia del Carmen Videla¹; Camila Rivero²;
Gisela Vanesa García^{1,3}; Débora Josela Ricciuto^{1,3}; Silvia Rodríguez¹;
Guillermo Alberto Studdert^{1*}

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Unidad Integrada Balcarce;

² Actividad privada;

³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

RESUMEN

La funcionalidad del suelo es afectada por la agricultura por lo que su uso sustentable requiere del monitoreo frecuente de su salud. Los indicadores de salud edáfica (ISE) permiten realizar dicho monitoreo sencilla y periódicamente. El dióxido de carbono (C) emitido en incubaciones aeróbicas cortas (Cmin) reúne condiciones para ser un ISE. No obstante, su posibilidad de desempeñarse como tal no ha sido suficientemente estudiada. El objetivo de este trabajo fue evaluar la sensibilidad del Cmin a 2 [Cmin(2)], 4 [Cmin(4)], 6 [Cmin(6)] y 10 [Cmin(10)] días de incubación al efecto de distintas prácticas de manejo y su relación con el C orgánico total (COT), el asociado a la fracción mineral (COA), el particulado (COP), el potencialmente mineralizable (C_p) y el oxidable con permanganato de potasio (CoxP), el nitrógeno mineralizado en anaerobiosis (NAN) y la estabilidad de agregados (EA) de un Molisol del sudeste bonaerense. Se determinaron Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6), y Cmin(10), COT, COA, COP, C_p, CoxP, NAN y EA (masa remanente de macroagregados, MasaMA_{MV}) en muestras de suelo (0-5 y 5-20 cm) de un ensayo de larga duración en Balcarce incluyendo rotaciones agricultura-pastura bajo labranza convencional y siembra directa (SD). Como se esperaba, los Cmin evaluados mostraron los patrones mostrados por las demás variables frente a los tratamientos: valores mayores bajo pastura y bajo SD, especialmente en 0-5 cm y 0-20 cm. La capacidad de distinguir entre manejos se incrementó con el aumento de los días de incubación. Los Cmin se correlacionaron (r de Pearson) con COT, COP, C_p, CoxP, NAN y MasaMA_{MV} (r=0,52 a r=0,96) (P<0,01) con coeficientes crecientes con los días de incubación. Se concluye que Cmin4 (r=0,59 a r=0,88) o Cmin6 (r=0,52 a r=0,93) podrían ser adecuados ISE. Es necesario continuar el estudio bajo otras condiciones edafoclimáticas y situaciones de manejo.

Palabras clave: emisión CO₂; tiempo de incubación; sistemas de cultivo; rotaciones con pasturas

ORGANIC CARBON MINERALIZED IN SHORT AEROBIC INCUBATION PERIODS AS SOIL HEALTH INDICATOR

ABSTRACT

Soil functioning is affected by agriculture. Therefore, sustainable soil use requires frequent soil health monitoring. Soil health indicators (ISE) allow to do soil health evaluation simply and periodically. The carbon (C) dioxide emission during short aerobic incubations (Cmin) could be used as an ISE. However, its performance as ISE has not been sufficiently evaluated. The objective of this work was to evaluate the sensitivity of Cmin at 2 [Cmin(2)], 4 [Cmin(4)], 6 [Cmin(6)], and 10 [Cmin(10)] days of incubation to the effect of different management practices and their relationship with total (COT), mineral associated (COA), particulate (COP), potentially mineralizable (C_p), and potassium permanganate oxidizable (CoxP) organic C, anaerobically mineralized nitrogen (NAN), and aggregate stability of a Mollisol from the southeastern Buenos Aires province. We determined Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6), and Cmin(10), COT, COA, COP, C_p, CoxP, NAN, and EA (remnant mass

* Autor de contacto:
gastudde@mdp.edu.ar

Recibido:
12-08-24

Recibido con revisiones:
15-10-24

Aceptado:
22-10-24

of macroaggregates, $MasaMA_{MV}$) in soil samples (0-5 and 5-20 cm) from a long-term experiment in Balcarce including crop-pasture rotations under conventional tillage and no-tillage (SD). As expected, the C_{min} showed a similar pattern as the rest of the variables reflecting the effect of the different management practices with greater values observed under pasture and SD, especially at 0-5 and 0-20 cm. The ability of the C_{min} to show the effect of the management practices evaluated increased with the increase of the duration of the incubation. The C_{min} correlated (Pearson r) to COT, COP, C₀, CoxP, NAN, and $MasaMA_{MV}$ ($r=0.52$ to $r=0.96$) ($P<0.01$) with coefficients increasing with the days of incubation. It is concluded that C_{min4} ($r=0.59$ to $r=0.88$) or C_{min6} ($r=0.52$ to $r=0.93$) could be used as adequate ISE. It is necessary to continue studying these relationships under contrasting soil, climate and management conditions.

Keywords: CO₂ emission; incubation period; cropping systems; crop-pasture rotations

ABREVIATURAS

50LC: rotación 50% del tiempo (3 años) con agricultura bajo labranza convencional; 50SD: rotación 50% del tiempo (3 años) con agricultura bajo siembra directa; 75LC: rotación 75% del tiempo (9 años) con agricultura bajo labranza convencional y 25% bajo pastura (3 años); 75SD: rotación 75% del tiempo (9 años) con agricultura bajo siembra directa y 25% bajo pastura (3 años); 100LC: agricultura continua bajo labranza convencional; 100SD: agricultura continua bajo siembra directa; C: carbono; C₀: carbono potencialmente mineralizable; C_{min} : carbono mineralizado; $C_{min}(t)$: carbono mineralizado en el tiempo (t) de incubación; CO₂: dióxido de carbono; COA: carbono orgánico asociado a la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; COT: carbono orgánico total; CoxP: carbono oxidable con permanganato de potasio; ISE: indicador de salud edáfica; LC: labranza convencional; $MasaMA_{MV}$: masa de agregados de 2000 a 8000 μm remanente luego de tamizado en agua siguiendo re-humedecimiento por inmersión súbita; N: nitrógeno; NAN: nitrógeno mineralizado en anaerobiosis; PP: pastura permanente; SD: siembra directa.

INTRODUCCIÓN

La reducción de la funcionalidad del suelo asociada a la producción agrícola hace necesario el monitoreo frecuente de la salud edáfica para ajustar el manejo y, de ser necesario, detener y revertir el proceso. Para ello, los actores del proceso productivo deben contar con herramientas sensibles que les permita hacer el seguimiento frecuente del estado de salud del suelo de una manera sencilla y accesible. Los indicadores de salud edáfica (ISE) son parámetros del suelo sensibles a los cambios producidos por el uso y el manejo y son, a la vez, de fácil y bajo costo de determinación, capaces de permitir una interpretación sencilla y reflejan las variaciones en el funcionamiento del suelo (Bünemann et al., 2018).

El funcionamiento del suelo utilizado para la agricultura y su capacidad de proveer servicios ecosistémicos dependen de cómo se haga dicho uso. Las combinaciones de cultivos en el tiempo y la intensidad de las secuencias, el sistema de labranza empleado, el uso de fertilizantes, enmiendas y/u otros agroquímicos, la manera en que se dispone el ganado, entre otras, inciden sobre distintas propiedades del suelo que son las responsables de definir la funcionalidad edáfica (Crespo et al., 2024; Cafaro-La-Menza y Carciocchi, 2023; Franzluebbbers y Hendrickson, 2024; González-Sosa et al., 2024; Lal, 2019; Olsson et al., 2023; Tourn et al., 2019). La intensificación ecológica del uso del suelo (Lal, 2019; Novelli et al., 2017) y las labranzas (Sheehy et al., 2015; Tourn et al., 2019) tienen una gran incidencia sobre la dinámica del carbono (C) orgánico (CO) en el suelo y sobre el mantenimiento de las propiedades físicas. Su correcta implementación debe conducir a aumentar o mantener los niveles de agregación y la estabilidad de los agregados y de CO en el suelo para mantener su salud (Lal, 2019) a través de la acción física directa, el aporte de C por parte de los cultivos (parte aérea y raíces) y el efecto de la permanencia de raíces vivas explorando el suelo, todo lo cual se relaciona con la actividad biológica edáfica. No obstante, en los sistemas de producción suele ser necesario tomar decisiones de manejo que pueden afectar el adecuado funcionamiento del suelo, es decir que atentan contra su salud. Es por ello que, disponer de ISE que permitan hacer un seguimiento frecuente de los cambios que se producen, es imprescindible para tomar decisiones de manejo complejas tendientes a morigerar efectos negativos y/o revertirlos (Franzluebbbers y Hendrickson, 2024).

El suelo alberga una gran actividad biológica (i.e., biota del suelo y raíces vivas) y de ella depende gran parte de la funcionalidad edáfica y de los servicios ecosistémicos que se esperan de aquél. Por lo tanto, la actividad biológica es clave para la caracterización del estado de salud del suelo y de los cambios producidos por su uso (Franzluebbbers, 2016, 2020). Así, la determinación del dióxido de C (CO₂) producto de la actividad biológica del suelo puede utilizarse como ISE (Haney et al., 2008) dada su relación con la biota edáfica y con el contenido de CO del suelo. Es así que se ha probado que el C potencialmente mineralizable

(C_0) es un buen ISE (Haney et al., 2008; Tourn et al., 2022) ya que reúne muchos de los atributos de aquéllos. En Molisoles del sudeste bonaerense, Tourn et al. (2022) mostraron que el C_0 fue muy sensible para distinguir el efecto de distintas prácticas de manejo y presentó elevadas correlaciones con varias propiedades del suelo que definen la salud edáfica. No obstante, la obtención del C_0 requiere incubaciones por tiempos prolongados (Beare et al., 1994, Mikha y Rice, 2004; Tourn et al., 2022) lo que limita la posibilidad de su uso para monitoreos frecuentes de la salud edáfica.

Varios autores (Franzluebbers et al. 2000; Haney et al., 2008; Moebius-Clune et al., 2016) han propuesto que el CO_2 emitido en incubaciones aeróbicas de suelo de pocos días es adecuado indicador de la actividad biológica edáfica potencial. En este sentido, Tourn et al. (2022) demostraron que, en Molisoles de elevado contenido de CO, el CO_2 emitido [i.e., CO mineralizado (Cmin)] en incubaciones aeróbicas cortas se relacionó lineal y estrechamente con el C_0 y que, por lo tanto, podría ser utilizado como estimador de éste. No se conoce si, además de ser un buen estimador del C_0 , el Cmin puede tener un buen desempeño como ISE. Se hipotetiza que el Cmin obtenido en pocos días de incubación aeróbica es un adecuado ISE y que su desempeño depende de la duración de la incubación. El objetivo de este trabajo fue evaluar la sensibilidad del Cmin a 2 [Cmin(2)], 4 [Cmin(4)], 6 [Cmin(6)] y 10 [Cmin(10)] días de incubación al efecto de distintas prácticas de manejo y la relación entre dichas variables y el CO total (COT), el asociado a la fracción mineral (COA) y el particulado (COP), el C_0 , el C oxidable con permanganato de potasio (CoxP), el nitrógeno (N) mineralizado en anaerobiosis (NAN) y la estabilidad de los agregados (EA) de un Molisol del sudeste bonaerense bajo manejos contrastantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y diseño experimentales

Se trabajó con muestras de un complejo de Argiudol Típico (aproximadamente 75%) (Soil Survey Staff, 2014) serie Mar del Plata (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 1979) y Argiudol Petrocálcico (aproximadamente 25%) (Soil Survey Staff, 2014) serie Balcarce (INTA, 1979) con el horizonte petrocálcico por debajo de los 0,7 m de profundidad, El horizonte superficial del complejo presenta textura franca (236, 343 y 408 g kg^{-1} de arcilla, limo y arena, respectivamente), un pH de 6,2 y una capacidad de intercambio catiónico de 24,9 cmol kg^{-1} con un 73,0% de saturación con bases (INTA, 1979). Dicho suelo está ubicado en un sector con menos de 2% de pendiente en la Unidad Integrada Balcarce (UIB, 37° 45' 09" S; 58° 18' 48" O; 140 msnm). El clima de la región es meso-termal subhúmedo-húmedo (Thorntwaite, 1948), con una mediana de precipitación anual, una media de evapotranspiración potencial anual y un promedio de temperatura media diaria (1971-2013) de 930,6 mm $año^{-1}$, 954,8 mm $año^{-1}$ y 14,0 °C, respectivamente, según datos obtenidos de la Estación Agrometeorológica de la UIB ubicada a 1000 m del ensayo (INTA, s.f.).

En 1976 se inició un ensayo de larga duración de rotaciones mixtas (cultivos y pasturas) y sistemas de labranza (Studdert et al., 1997). En la primera etapa del ensayo (1976-1993) se utilizó labranza convencional (LC) para distintas combinaciones de cultivos y rotaciones con pasturas con base de gramíneas (Studdert et al., 1997). A partir de 1994 y hasta el año de muestreo (2014) hubo tratamientos bajo LC y tratamientos bajo siembra directa (SD) (Tourn et al., 2019). En esta segunda etapa del ensayo se definieron distintas combinaciones de periodos bajo cultivo de cosecha y periodos bajo pastura con base de gramíneas y ambos sistemas de labranza (sistemas de cultivo): 1) PP: pastura permanente, 2) 100SD: agricultura continua bajo SD, 3) 100LC: agricultura continua bajo LC, 4) 50SD: rotación 50% del tiempo (3 años) con agricultura bajo SD y 50% bajo pastura (3 años), 5) 50LC: rotación 50% del tiempo (3 años) con agricultura bajo LC y 50% bajo pastura (3 años), 6) 75SD: rotación 75% del tiempo con agricultura (9 años) bajo SD y 25% bajo pastura (3 años), 7) 75LC: rotación 75% del tiempo con agricultura (9 años) bajo LC y 25% bajo pastura (3 años). La secuencia de cultivos para los periodos bajo agricultura fue maíz (*Zea mays* L.) - soja (*Glycine max* L. Merr.) - trigo (*Triticum aestivum* L.). Los cultivos de cosecha recibieron fertilización nitrogenada (60 kg N ha^{-1} bajo la forma de urea) y fosforada (entre 12 y 20 kg P ha^{-1} bajo la forma de superfosfato triple de calcio). En el momento del muestreo del suelo, 50SD y 50LC se encontraban en el segundo año de uno de los periodos bajo pastura y 75SD y 75LC se encontraban en el quinto año de agricultura luego de un periodo de pastura. Además, 75SD, 75LC, 100SD y 100LC se encontraban con rastrojo de soja. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados. Más información del ensayo y del diseño experimental se puede observar en Tourn et al. (2019).

Muestreo, procesamiento de las muestras y determinaciones analíticas

Las muestras fueron tomadas con pala de las capas de 0-5 cm y de 5-20 cm en el otoño de 2014 y estuvieron compuestas por 5 submuestras por unidad experimental del ensayo. En el proceso de toma de las muestras se procuró que generar el menor disturbio posible a la estructura del suelo y se descartó el suelo que estuvo en contacto con la herramienta. Los agregados de las muestras frescas fueron cuidadosamente separados

a mano hasta pasar por un tamiz de 8000 μm de abertura de malla y se secaron a 40 °C en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante para luego ser almacenadas hasta su utilización. Para la determinación de la estabilidad de agregados se utilizaron alícuotas de las muestras pasadas por tamiz de 8000 μm . Se utilizó el procedimiento indicado por García et al. (2020) para el tamizado en agua y recuperación de los agregados >2000 μm remanentes. Brevemente, 100 g de suelo pasado por tamiz de 8000 μm seco se colocaron sobre un tamiz de 2000 μm de abertura de malla y fueron sumergidos en agua durante 5 min. Posteriormente, se procedió al tamizado durante 2 min con 50 oscilaciones por minuto con un recorrido de 3 cm procurando que los agregados entraran y salieran del agua en cada oscilación. Los agregados >2000 μm remanentes luego del tamizado fueron recuperados en un recipiente por retro-lavado del tamiz, se los dejó decantar por 24 h y, luego de extraer el sobrenadante, se los secó en estufa con circulación forzada de aire a 50 °C hasta peso constante ($\text{MasaMA}_{\text{MV}}$) que fue registrado. Se calculó la $\text{MasaMA}_{\text{MV}}$ para la capa de 0-20 cm como el promedio ponderado por espesor de la capa de la $\text{MasaMA}_{\text{MV}}$ a 0-5 cm y 5-20 cm.

Para las determinaciones de contenido de CO, de NAN y de CoxP, alícuotas de las muestras secas almacenadas fueron molidas con mortero hasta pasar por tamiz de 2000 μm de abertura de malla eliminando los residuos vegetales que quedaban sobre el tamiz. El COT se determinó en alícuotas re-molidas con mortero hasta pasar por tamiz de 500 μm por el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio en medio ácido con mantenimiento de la temperatura de reacción (120 °C) durante 90 min (Nelson y Sommers, 1982). Posteriormente, cada suspensión se centrifugó a 1000 x RCF durante 10 min. Para la cuantificación del COT se midió la absorbancia del sobrenadante a 578 nm con un espectrofotómetro de luz visible Numak 721 (Shanghai Yoke Instrument Co. Ltd., Shanghai, China) y la concentración de CO se calculó a partir de una recta de calibración construida con distintas diluciones de tartrato de sodio 0,5 M. Una alícuota de cada muestra de suelo fue sometida a fraccionamiento físico por tamaño de partícula para separar la fracción orgánica asociada a limo y arcilla (<50 μm) de la fracción orgánica particulada junto con la arena (>50 μm) según el método descrito por Cambardella y Elliott (1992). Brevemente, a 10 g de suelo seco y molido (2000 μm) se le agregaron 30 mL de una solución de hexametáfosfato de sodio (5 g L⁻¹) y se agitó en un agitador rotatorio durante 16 h. El contenido del recipiente de agitación se volcó sobre un tamiz de 50 μm de abertura de malla y se tamizó con ayuda de una corriente de agua desmineralizada. En el tamiz quedó retenida la fracción orgánica particulada y la arena. La fracción orgánica asociada a limo y arcilla más el limo y la arcilla fueron recogidos en un vaso de precipitado. La fracción >50 μm fue descartada y a la fracción <50 mm se le determinó el COA según fuera descrito para COT. El contenido de COP se calculó como la diferencia entre el contenido de COT y el de COA (Cambardella y Elliott, 1992). Los contenidos de COT, COA y COP se expresaron en g C (kg suelo)⁻¹. Se calcularon los contenidos de COT, COA y COP para la capa de 0-20 cm como el promedio ponderado por espesor de los contenidos a 0-5 cm y 5-20 cm.

El NAN se determinó mediante una incubación anaeróbica corta (7 días) a 40 °C de 5 g de suelo seco y molido (<2000 μm) en tubos de ensayo de 15 cm de largo y 1,6 cm de diámetro completados con agua desmineralizada y herméticamente cerrados, según lo descrito por Keeney (1982). La determinación del N de amonio producido durante la incubación se realizó por destilación por arrastre con vapor (Keeney y Nelson, 1982) y recolección del destilado en 5 mL de ácido bórico al 2% m/v con indicador mixto (verde de bromocresol y rojo de metilo). Finalmente, se tituló con ácido sulfúrico 0,005 N. El NAN se expresó en mg N-amonio (kg suelo)⁻¹. Se calculó el NAN para la capa de 0-20 cm como el promedio ponderado por espesor del NAN a 0-5 cm y 5-20 cm.

La determinación de CoxP fue realizada de acuerdo con el procedimiento descrito por Culman et al. (2012). Brevemente, se agregaron 20 mL de una solución 0,02 M de permanganato de potasio (pH 7,2) en tubos de polipropileno de 50 mL de capacidad conteniendo 2,5 g de suelo seco y molido (<2000 μm). Los tubos con la suspensión fueron agitados en un agitador recíproco horizontal por 2 min a 120 RPM por minuto y luego centrifugados por 10 min a 1006 x RCF. Luego se tomaron alícuotas de 0,2 mL de los sobrenadantes y fueron transferidas a tubos de ensayo a los que se les agregaron 10 mL de agua desmineralizada. Para la cuantificación del CoxP se midió la absorbancia de estas soluciones a 525 nm con un espectrofotómetro de luz visible Numak 721 (Shanghai Yoke Instrument Co. Ltd., Shanghai, China) y la concentración de CoxP se calculó a partir de una recta de calibración construida con distintas soluciones de permanganato de potasio. El CoxP se expresó en g C (kg suelo)⁻¹. Se calculó el CoxP para la capa de 0-20 cm como el promedio ponderado por espesor del CoxP a 0-5 cm y 5-20 cm.

Para la determinación del Cmin se cuantificó el CO₂ producido en incubaciones aeróbicas en condiciones controladas de temperatura y humedad (Beare et al., 1994; Mikha y Rice, 2004) según se describió en Tourn et al. (2022) para este experimento. Brevemente, se incubaron 3 g de suelo molido re-humedecido con agua

desionizada hasta capacidad de campo (0,03 MPa) en recipientes de vidrio de 154 mL de volumen interno provistos de una tapa con cierre hermético y un septo de goma para realizar extracciones de gases con jeringa. Los frascos se incubaron a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. A los 2, 4, 6, 10, 16, 22 y 28 días de iniciado el ensayo (Mikha y Rice, 2004). De cada frasco se extrajeron muestras de aire con una jeringa de 10 mL. El contenido de la jeringa se traspasó a tubos de vidrio pre-evacuados (Vacutainer®, Franklin Lakes, Nueva Jersey, Estados Unidos de Norteamérica). En cada momento de extracción y luego de extraer las muestras de aire, los frascos de incubación se dejaron abiertos durante 60 min para que se equilibraran las concentraciones de CO_2 dentro y fuera (atmósfera) de ellos. La determinación de la concentración de CO_2 de cada muestra se realizó inyectando 1 mL de gas en un cromatógrafo de fase gaseosa Shimadzu GC-17A (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón) equipado con un detector de conductividad térmica y una columna GS-Q de 30 m x 0,53 mm. Se utilizó helio como gas transportador y las temperaturas de trabajo de la columna, inyector y detector fueron de 40, 100 y $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Con el valor absoluto de la concentración de CO_2 ($\text{mL CO}_2\text{ }100\text{ (mL aire)}^{-1}$) determinado por el equipo se calculó el C_{min} por unidad de masa de suelo ($\text{mg C (kg suelo)}^{-1}$). Los valores de C_{min} de cada momento de extracción de aire de los frascos fueron sumándose a los anteriores para obtener el C_{min} acumulado hasta cada momento de extracción ($C_{\text{min}}(t)$, siendo t el tiempo de incubación en días). Para la capa de 0-20 cm los valores de $C_{\text{min}}(t)$ se calcularon como promedio ponderado por espesor de los valores de $C_{\text{min}}(t)$ a 0-5 cm y 5-20 cm. Tourn et al. (2022) observaron que a los 28 días de incubación no se alcanzaba la estabilización de la emisión de CO_2 en todas las situaciones evaluadas. Esto indicaba que a los 28 días de incubación algunos tratamientos aún conservaban fracciones fácilmente mineralizables de C. Por lo tanto, en una medición adicional para los tratamientos PP, 100SD y 100LC se determinaron los C_{min} hasta los 63 días de incubación ($C_{\text{min}}(63)$) y se vio que presentaban elevada correlación con los $C_{\text{min}}(28)$ permitiendo generar un modelo de predicción. Así, de acuerdo con lo indicado por Tourn et al. (2022) se estimaron los $C_{\text{min}}(63)$ del resto de los tratamientos. Con los valores de $C_{\text{min}}(0)$ a $C_{\text{min}}(28)$ más los $C_{\text{min}}(63)$, medidos o estimados, según correspondiera, se ajustó una ecuación de primer orden para obtener C_0 ($\text{mg C (kg suelo)}^{-1}$) y la constante de mineralización de C (k , día^{-1}) como parámetros de ajuste:

$$C_{\text{min}}(t) = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde t es el día de incubación al que se realizó la extracción de gas de los frascos y representa el período de acumulación de CO_2 desde el inicio de la incubación. El C_0 a 0-20 cm se calculó con la Ecuación 1 con los $C_{\text{min}}(t)$ calculados para 0-20 cm.

Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los SC sobre cada variable, el análisis estadístico fue realizado mediante un modelo lineal mixto siendo los sistemas de cultivo efecto fijo y los bloques, efecto aleatorio. Se realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias (test de Tukey) utilizando el paquete Rcmdr del sistema R (R Core Team, 2020). El ajuste de la Ecuación 1 se realizó mediante análisis de regresión no lineal utilizando el paquete Stats (función nls) del sistema R (R Core Team, 2020). Para evaluar la relación entre variables, se realizaron análisis de correlación (Pearson) utilizando el paquete Rcmdr del sistema R (R Core Team, 2020) haciendo un grupo común con los datos provenientes de las profundidades 0-5 y 5-20 cm, por un lado, y con la información de la capa 0-20 cm, por el otro. En todos los análisis estadísticos se consideró un nivel de significación del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los valores de COT, COA, COP, CoxP, $\text{MasaMA}_{\text{MV}}$ y NAN a las tres profundidades analizadas. Todas las variables, excepto COA, fueron sensibles a los sistemas de cultivo, especialmente en 0-5 cm y 0-20 cm (Tabla 1). En términos generales, los sistemas de cultivo que se encontraban bajo pastura al momento de la toma de muestras (i.e., PP, 50SD y 50LC) presentaron los valores más elevados de COT, COP, CoxP, $\text{MasaMA}_{\text{MV}}$ y NAN. Esto indica que el suelo bajo pastura se encontraba en mejores condiciones de salud edáfica tal como fue reportado por diversos autores para situaciones bajo pastura o sin agricultura por períodos prolongados (Cates et al., 2016; Ernst y Siri-Prieto, 2009; Franzluebbers et al., 2014; García et al., 2020b; González-Sosa et al., 2024; Rabot et al., 2018; Rodríguez et al., 2022; Studdert et al., 1997). La mayor intensificación ecológica de la agricultura por inclusión de pasturas en la combinación de cultivos conduce a un gran aporte de C al suelo y a una colonización de su volumen por sistemas radicales densos y voluminosos durante períodos prolongados (Franzluebbers et al., 2014; Tourn et al., 2019). Por otro lado, en general, los tratamientos bajo cultivos agrícolas con SD (i.e., 75SD y 100SD) mostraron valores de COT, COP, CoxP, $\text{MasaMA}_{\text{MV}}$ y NAN más elevados que aquéllos bajo LC (i.e., 75LC y 100LC), especialmente en 0-5 cm. La presencia en superficie de los residuos de los cultivos antecesores y la ausencia de laboreo bajo SD provoca una acumulación de fracción orgánica en superficie (Domínguez et al., 2009; Ogle et al., 2019; Powlson et al., 2014; Puget y Lal, 2005; Studdert et al., 2017) y una mayor estabilidad estructural (Sheehy et al., 2015; Six et

Tabla 1: Variables indicadoras del estado de salud del suelo a tres profundidades (Prof.) bajo siete sistemas de cultivo (Trat., ver la identificación en Materiales y Métodos). Los valores son promedio de tres repeticiones. Valores seguidos por letras iguales dentro de cada variable y para cada profundidad no difieren significativamente (Tukey, P > 0,05).

Table 1: Soil health status indicator variables at three depths (Prof.) under seven cropping systems (Trat., see Materials and Methods for the identification). The values are the average of three replications. Values followed by the same letters for each variable and within each depth are not significantly different (Tukey, P > 0.05).

Prof.	Trat.	COT		COA		COP		CoxP		MasaMA _{MV}		NAN							
		Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE						
		g kg ⁻¹										mg kg ⁻¹							
0 - 5 cm	PP	40,7	a	1,02	23,3	ab	1,11	17,5	a	1,11	0,80	a	0,14	45,3	a	2,66	144,2	a	4,34
	50SD	39,1	a	1,39	23,3	ab	1,11	15,8	a	0,84	0,64	bc	0,08	34,3	ab	2,13	124,6	a	4,66
	75SD	35,9	b	0,81	24,3	ab	0,64	11,6	b	0,49	0,69	b	0,20	23,0	c	1,60	122,8	a	3,00
	100SD	34,8	b	0,57	22,6	b	1,18	12,2	b	1,30	0,66	bc	0,21	36,3	b	2,13	143,2	a	1,38
	50LC	34,4	b	0,49	25,9	a	0,94	8,5	c	0,82	0,58	c	0,21	24,7	c	1,62	78,8	b	1,80
	75LC	27,6	c	0,95	24,2	b	1,02	3,4	d	0,59	0,59	c	0,27	3,5	d	0,63	63,4	b	1,94
	100LC	27,6	c	0,72	24,5	b	0,48	3,1	d	0,56	0,48	d	0,23	1,7	d	0,40	55,5	b	2,59
5 - 20 cm	PP	32,2	a	0,93	24,1	a	0,84	8,0	a	0,77	0,47	a	0,12	29,4	a	1,98	76,6	a	1,43
	50SD	29,4	bc	0,76	23,5	a	1,09	5,9	abc	1,20	0,43	a	0,30	9,6	b	1,09	61,6	abc	2,57
	75SD	30,5	ab	1,00	23,9	a	0,96	6,6	abc	1,24	0,49	a	0,21	6,3	cd	0,79	52,0	bc	3,46
	100SD	26,6	d	1,14	21,7	a	1,18	4,8	bc	0,79	0,38	a	0,19	14,3	bc	1,20	54,7	bc	1,90
	50LC	30,6	ab	0,88	23,8	a	1,27	6,8	ab	0,92	0,49	a	0,27	14,1	b	1,05	64,2	ab	3,67
	75LC	27,5	cd	0,83	23,9	a	0,90	3,6	c	0,73	0,47	a	0,20	3,4	de	0,57	42,7	c	2,37
	100LC	26,6	d	0,92	22,6	a	0,39	4,0	bc	1,00	0,38	a	0,21	1,2	e	0,42	49,9	bc	1,54
0 - 20 cm	PP	34,3	a	0,90	23,9	a	0,89	10,4	a	0,79	0,52	ab	0,10	33,4	a	2,15	93,5	a	2,21
	50SD	31,9	b	0,76	23,5	a	1,09	8,4	ab	0,96	0,52	ab	0,26	15,8	b	1,35	77,4	ab	2,87
	75SD	31,8	b	0,94	24,0	a	0,85	7,8	B	1,08	0,54	a	0,21	10,5	c	1,00	69,7	bc	3,09
	100SD	28,6	c	0,96	21,9	a	1,18	6,7	B	0,90	0,45	ab	0,15	19,8	b	1,43	76,8	ab	1,53
	50LC	31,5	b	0,73	24,3	a	1,01	7,2	B	0,70	0,51	ab	0,25	16,7	b	1,20	67,9	bc	3,30
	75LC	27,5	c	0,85	23,9	a	0,93	3,6	C	0,70	0,50	ab	0,17	3,4	d	0,59	47,9	d	2,27
	100LC	26,9	c	0,73	23,1	a	0,39	3,8	C	0,82	0,41	b	0,18	1,3	d	0,42	51,3	cd	1,86

* EE: error estándar de la media, COT: carbono (C) orgánico (CO) total, COA: CO asociado a los minerales, COP: CO particulado, CoxP: C oxidable con permanganato de potasio, MasaMAMV: masa de agregados mayores que 2000 mm remanentes luego de inmersión súbita y tamizado en agua, NAN: nitrógeno mineralizado en anaerobiosis.

* EE: standard error of the mean, COT: total organic carbon (CO), COA: mineral associated CO, COP: Particulate CO, CoxP: carbon oxidizable with potassium permanganate, MasaMAMV: remnant mass of aggregates larger than 2000 mm after sudden immersion and sieving in water, NAN: nitrogen mineralized in anaerobiosis.

al., 2004) lo que, a su vez, lleva a una mayor protección de la fracción orgánica (Six et al., 2004; Tourn, 2020). Todas estas variables (i.e., COT, COP, CoxP, MasaMA_{MV} y NAN) han sido postuladas como indicadores del estado de salud del suelo. El COT es el indicador universal de salud edáfica (Bünemann et al., 2018), aunque en muchas situaciones no es lo suficientemente sensible para mostrar cambios debidos al manejo en el corto a mediano plazo (Domínguez et al., 2009). El COP es, por su parte, una fracción que varía más marcadamente en el corto plazo en respuesta a distintas combinaciones de cultivos y sistemas de labranza (Bünemann et al., 2018; Domínguez et al., 2009). No obstante, el procedimiento para su determinación desalienta la adopción por los laboratorios de servicio a productores (Diovisalvi et al., 2014). El CoxP ha sido postulado como indicador sensible de la salud del suelo (Culman et al., 2012) y ha sido propuesto para integrar índices de salud edáfica (Moebius-Clune et al., 2016) y como un indicador rápido, seguro y sencillo del COT (Rodríguez et al., 2022). La estabilidad de agregados es la variable física más sensible a las prácticas de manejo (Aparicio y Costa, 2007; Rabot et al., 2018) y se ha demostrado que MasaMA_{MV} refleja adecuadamente el estado de la estabilidad de agregados y puede ser utilizado como un indicador rápido y sencillo de la salud física del suelo (García et al., 2020a, 2020b). Domínguez et al. (2016) propusieron al NAN como indicador de salud edáfica y Rivero et al. (2020) y García et al. (2020b) demostraron que esta variable se correlaciona con otras variables edáficas que determinan la salud del suelo. Además, el NAN también ha sido incorporado en índices de salud edáfica (Moebius-Clune et al., 2016) y es utilizado exitosamente para apoyar el diagnóstico de la disponibilidad de N para los cultivos (Reussi-Calvo et al., 2018).

La mineralización de C permite reflejar los procesos que gobiernan los cambios en el contenido de fracciones orgánicas y su grado de protección en respuesta a diferentes usos y manejo del suelo (Franzluebbbers, 2020; Haney et al., 2008). Variables que reflejen la mineralización del C orgánico del suelo son considerados indicadores de la actividad biológica y del tamaño de la biomasa microbiana y hacen un aporte al conocimiento del estado de salud edáfica (Bünemann et al., 2018; Moebius-Clune et al., 2016). Se ha demostrado (Tourn et al., 2022) que el C₀ es un buen ISE ya que es sensible para distinguir los efectos de las prácticas de manejo (Tabla 2). No obstante, la duración de las incubaciones (Beare et al., 1994; Mikha y Rice, 2004; Tourn et al., 2022) para determinar el C₀ desalientan su utilización para el monitoreo frecuente del estado de salud edáfica. Coincidentemente con otros autores (Haney et al., 2008), Tourn et al. (2022) demostraron que el C_{min} en los primeros momentos de la incubación podía ser buen estimador de C₀. Así, Tourn et al. (2022) mostraron que C_{min}(2), C_{min}(4), C_{min}(6) y C_{min}(10) se relacionaban con C₀ con elevados coeficientes de correlación de Pearson (a 0-20 cm 0,68, 0,83, 0,90 y 0,92, respectivamente).

La dinámica de la mineralización del C del suelo puede dar evidencias de si el uso del suelo estimula o perjudica al secuestro de C en el suelo (Haney et al., 2008; Franzluebbbers, 2020). Haney et al. (2008) propusieron que la determinación del CO₂ emitido por el suelo en incubaciones de duración variable podría utilizarse como indicador de la salud de un suelo. En la Tabla 2 se muestra C_{min}(2), C_{min}(4), C_{min}(6) y C_{min}(10) y C₀ a las tres profundidades analizadas. Se observó que C_{min}(2), C_{min}(4), C_{min}(6) y C_{min}(10) fueron también sensibles a las prácticas de manejo ya que permitieron distinguir los efectos de los distintos sistemas de cultivo evaluados. En todos los casos PP mostró los mayores valores seguidos por los sistemas bajo pastura (i.e., 50SD y 50LC) y luego por los sistemas bajo agricultura (i.e., 75SD, 75LC, 100SD y 100LC) (Tabla 2). El principal efecto de las pasturas se observó en la capa de 0-5 cm (Tabla 2), posiblemente como consecuencia de la gran acumulación de broza en superficie (Curtin et al., 2014). Además, a esa profundidad, el denso sistema radical de las pasturas de gramíneas habría generado una elevada concentración de compuestos carbonados lábiles que dieron origen a una mayor emisión de CO₂ durante la incubación (Curtin et al., 2014; Ernst y Siri Prieto, 2009).

Tabla 2: Carbono orgánico del suelo (CO) mineralizado acumulado a 2, 4, 6 y 10 días de incubación (Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6) y Cmin(10), respectivamente) y CO potencialmente mineralizable (C₀) a tres profundidades (Prof.) bajo siete sistemas de cultivo (Trat., ver la identificación en Materiales y Métodos). Los valores son promedio de tres repeticiones. EE: error estándar de la media. Valores seguidos por letras iguales dentro de cada variable y para cada profundidad no difieren significativamente (Tukey, P > 0,05).

Table 2: Mineralized soil organic carbon (CO) accumulated at 2, 4, 6, and 10 days of incubation (Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6), and Cmin(10), respectively) and potentially mineralized CO (C₀) at three depths (Prof.) under seven cropping systems (Trat., see Materials and Methods for the identification). The values are the average of three replications. EE: standard error of the mean. Values followed by the same letters for each variable and within each depth are not significantly different (Tukey, P > 0.05).

Prof.	Trat.	Cmin(2)		Cmin(4)		Cmin(6)		Cmin(10)		C ₀						
		Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE					
----- mg kg ⁻¹ -----																
0 - 5 cm	PP	158,9	a	2,47	266,6	a	1,11	361,6	a	1,11	456,8	a	2,66	1067,9	a	4,34
	50SD	158,7	a	2,79	252,3	a	1,11	337,4	a	0,84	413,5	a	2,13	754,3	b	4,66
	75SD	146,1	a	4,87	245,5	a	0,64	325,8	a	0,49	427,7	a	1,60	642,7	bc	3,00
	100SD	141,5	a	1,75	226,0	ab	1,18	303,6	ab	1,30	383,0	ab	2,13	707,0	b	1,38
	50LC	152,8	a	3,58	233,0	ab	0,94	315,4	a	0,82	385,6	ab	1,62	763,8	b	1,80
	75LC	127,0	ab	3,53	182,7	bc	1,02	242,4	bc	0,59	309,5	bc	0,63	505,1	cd	1,94
	100LC	103,1	b	2,81	169,8	c	0,48	233,2	c	0,56	292,7	c	0,40	464,1	d	2,59
5 - 20 cm	PP	138,6	ab	2,81	236,3	ab	0,84	322,6	a	0,77	390,8	A	1,98	519,5	a	1,43
	50SD	153,7	a	3,83	226,4	ab	1,09	278,3	ab	1,20	316,4	cd	1,09	449,0	ab	2,57
	75SD	133,3	abc	6,14	203,9	abc	0,96	259,1	abc	1,24	325,6	bc	0,79	439,9	ab	3,46
	100SD	81,5	c	3,73	152,7	c	1,18	216,3	bc	0,79	294,9	cde	1,20	457,8	ab	1,90
	50LC	155,0	a	2,95	247,2	a	1,27	315,4	a	0,92	365,9	ab	1,05	471,1	ab	3,67
	75LC	119,9	abc	3,92	181,0	bc	0,90	213,9	bc	0,73	275,4	de	0,57	453,9	ab	2,37
	100LC	90,6	bc	1,93	144,3	c	0,39	200,3	c	1,00	253,7	e	0,42	413,0	b	1,54
0 - 20 cm	PP	143,6	a	2,71	243,8	a	0,89	332,4	a	0,79	407,3	a	2,15	648,4	a	2,21
	50SD	154,9	a	3,35	232,8	ab	1,09	293,1	ab	0,96	340,7	bc	1,35	522,8	b	2,87
	75SD	136,5	ab	5,46	214,3	abc	0,85	275,8	abc	1,08	351,1	bc	1,00	492,6	bc	3,09
	100SD	96,5	b	3,16	171,0	cd	1,18	238,1	bcd	0,90	316,9	cd	1,43	517,3	b	1,53
	50LC	154,5	a	2,04	243,6	a	1,01	315,4	a	0,70	370,8	ab	1,20	537,1	b	3,30
	75LC	121,6	ab	3,78	181,5	bcd	0,93	221,0	cd	0,70	283,9	de	0,59	480,9	bc	2,27
	100LC	93,7	b	2,07	150,7	d	0,39	208,6	d	0,82	263,5	e	0,42	425,8	c	1,86

Del mismo modo, y por motivos similares, los sistemas bajo SD tendieron a mostrar valores de Cmin(t) levemente menores que bajo pastura (i.e., PP y 50SD) y con leves diferencias entre tratamientos (i.e., 50SD, 75SD y 100SD), pero mayores que bajo LC, especialmente en la capa de 0-5 cm (Puget y Lal, 2005; Powlson et al., 2014). Los Cmin(t) de los tratamientos bajo cultivos anuales (i.e., 75SD, 75LC, 100SD y 100LC) mostraron pequeñas diferencias entre ellos dentro de cada sistema de labranza, pero las diferencias con los sistemas de cultivo bajo pastura al momento de muestreo (i.e., PP, 50SD y 50LC) fueron más marcadas y significativas bajo LC (i.e., 75LC y 100LC vs PP y 50LC). En todos los casos, los menores valores de Cmin(t) y C₀ se verificaron en el tratamiento 100LC (Tabla 2). Cabe destacar que la sensibilidad para distinguir los efectos del manejo se fue incrementando con el aumento de los días de incubación (Tabla 2). Estos resultados y la estrecha relación entre los Cmin(t) y C₀ sugieren que, para los suelos bajo estudio, el C mineralizado en incubaciones aeróbicas de escasa duración podría ser propuesto como ISE (Culman et al., 2013; Franzluebbers, 2016, 2020; Ladoni et al., 2015).

Comparando las Tablas 1 y 2 puede verse que, en general, los Cmin(t) (Tabla 2) permitieron discriminar los diferentes sistemas de cultivo evaluados de manera similar a COT, COP, CoxP, MasaMA_{MV} y NAN (Tabla 1). Dado que los Cmin(t) son mayormente debidos a la mineralización de fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo (Franzluebbers et al., 2000; Haney et al., 2008), era esperable que su comportamiento ante las diferentes prácticas de manejo fuera similar al frecuentemente reportado para otras propiedades del suelo que reflejan la dinámica de aquellas fracciones (Culman et al., 2013; Domínguez et al., 2016; García et al., 2020b; Rabot et al., 2018).

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6) y Cmin(10) y COT, COP, COA, C₀, CoxP, NAN y MasaMA_{MV}. Como era de esperar, las relaciones de los Cmin(t) con los parámetros edáficos mencionados fueron estrechas para todos los parámetros (r de Pearson entre 0,52 y 0,92 y 0,45 y 0,96 para 0-5 + 5-20 cm y 0-20 cm, respectivamente), excepto para COA que, como era esperado, en todos los casos mostró una relación leve o no significativa.

Tabla 3: Coeficientes de correlación de Pearson entre carbono (C) orgánico del suelo (CO) mineralizado acumulado a 2, 4, 6 y 10 días de aeróbica incubación (Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6) y Cmin(10), respectivamente) y CO total (COT), asociado a la fracción mineral (COA), particulado (COP), potencialmente mineralizable (C₀) y oxidable con permanganato de potasio (CoxP), masa de agregados mayores que 2000 μm remanentes luego de inmersión súbita y tamizado en agua (MasaMA_{MV}), nitrógeno mineralizado en anaerobiosis (NAN). NS: no significativa (P > 0,05).

Table 3: Pearson correlation coefficients between accumulated mineralized organic (CO) carbon (C) after 2, 4, 6, and 10 days of aerobic incubation (Cmin(2), Cmin(4), Cmin(6) y Cmin(10), respectively), and total (COT), mineral associated (COA), particulate (COP) and potentially mineralizable (C₀) CO, potassium permanganate oxidizable C (CoxP), mass of remnant aggregates greater than 2000 μm after immersion wetting and water sieving (MasaMA_{MV}), anaerobically mineralized nitrogen (NAN). NS: not significant (P > 0,05).

Prof.	Cmin	Variables						
		COT	COP	COA	C ₀	CoxP	NAN	MasaMA _{MV}
cm	mg kg ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	g
0-5 + 5-20	Cmin(2)	0,70**	0,61**	0,33*	0,72**	0,53**	0,52**	0,60**
	Cmin(4)	0,81**	0,74**	NS	0,79**	0,59**	0,66**	0,75**
	Cmin(6)	0,86**	0,80**	NS	0,81**	0,62**	0,74**	0,83**
	Cmin(10)	0,92**	0,85**	NS	0,82**	0,71**	0,80**	0,87**
0-20	Cmin(2)	0,77**	0,62**	0,51*	0,53*	0,60**	NS	0,49*
	Cmin(4)	0,88**	0,76**	0,45*	0,71**	0,61**	0,58**	0,68**
	Cmin(6)	0,93**	0,84**	NS	0,79**	0,52*	0,73**	0,79**
	Cmin(10)	0,96**	0,88**	NS	0,86**	0,54*	0,77**	0,86**

* P < 0,05; ** P < 0,01

La escasa o nula relación entre los $C_{min}(t)$ y COA puede relacionarse con el hecho de que esta última fracción corresponde a la materia orgánica del suelo más estabilizada. En el suelo bajo estudio, el COA muestra, por lo general, escasa variación debida al efecto de las prácticas de manejo (Domínguez et al., 2009; Studdert et al., 2017; Tourn et al., 2019). Por su parte, los $C_{min}(t)$ reflejan el contenido de fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo (Franzluebbers et al., 2000; Haney et al., 2008) y sus valores mostraron mayor sensibilidad a los sistemas de cultivo evaluados (Tabla 2) que el COA (Tabla 1), motivo por el cual la evaluación de la variación conjunta de $C_{min}(t)$ y COA dio por resultado el mostrado en la Tabla 3.

Todos los coeficientes de correlación de Pearson entre los $C_{min}(t)$ y las variables edáficas con correlación significativa se incrementaron con el aumento de los días de incubación (Tabla 3). Esto indica que el incremento del tiempo de incubación permitió la mineralización de una proporción creciente de las fracciones orgánicas mineralizables y con ello una más elevada relación con aquellas variables que representan el tamaño de la fracción orgánica del suelo (Tabla 3). Son particularmente bajos los coeficientes de correlación de Pearson entre los $C_{min}(t)$ y CoxP que representa el tamaño de una fracción lábil de la materia orgánica del suelo y ha sido postulado como un buen ISE (Culman et al., 2012; Moebius-Clune et al., 2016). Sin embargo, Culman et al. (2013) informaron resultados similares a los mostrados en la Tabla 3. Por otro lado, Rodríguez et al. (2022) demostraron que, en los suelos bajo estudio, el comportamiento del CoxP como ISE no fue el esperado dado que no fue suficientemente sensible a manejos contrastantes (Tabla 1).

Los coeficientes de correlación de Pearson a partir de $C_{min}(4)$ fueron elevados y, en general, con leves incrementos para $C_{min}(6)$ y $C_{min}(10)$. Así, como ya fue postulado, el CO_2 emitido en incubaciones aeróbicas de 4 a 10 d podría utilizarse no sólo como indicador de la actividad microbiana potencial (Culman et al., 2013; Ladoni et al., 2015; Franzluebbers, 2016, 2020; Tourn et al., 2022), sino también como indicador de otras variables que intervienen en la definición de la salud edáfica (i.e., COT, COP, C_o , CoxP, NAN y $MasaMA_{MV}$). Los resultados mostrados en la Tabla 3 muestran que incubaciones de 4 ó 6 días podrían ser suficientes para permitir conocer valores de CO_2 emitido que orientaran respecto al estado de salud del suelo. Estos resultados muestran coincidencia con los reportados por Franzluebbers et al. (2000) y Culman et al. (2013) quienes postularon que el CO_2 emitido en incubaciones de 3 y 1 d, respectivamente, se relacionaba con distintas propiedades del suelo y lo postulan como ISE. Asimismo, Bassi et al. (2022), determinaron elevados coeficientes de correlación de Pearson entre el CO_2 emitido durante incubaciones de 3 días (Franzluebbers et al., 2000) y COT, COP, C_o , NAN y $MasaMA_{MV}$ (r entre 0,88 y 0,94) para el mismo tipo de suelo bajo manejos similares. A diferencia de Bassi et al. (2022), la Tabla 3 muestra que, en este trabajo, $C_{min}(4)$ y $C_{min}(6)$ presentaron r de Pearson más bajos, lo cual indica la necesidad de continuar profundizando en el estudio de la capacidad del CO_2 emitido en incubaciones cortas como ISE.

CONCLUSIONES

Los $C_{min}(t)$ obtenidos con 2 [$C_{min}(2)$], 4 [$C_{min}(4)$], 6 [$C_{min}(6)$] y 10 [$C_{min}(10)$] días de incubación apoyaron la primera parte de nuestra hipótesis ya que todos mostraron un adecuado desempeño como ISE por permitir distinguir entre prácticas de manejo y mostrar correlación con otras variables que intervienen en la definición de la salud edáfica. Del mismo modo, la segunda parte de la hipótesis estuvo sustentada por el hecho de que los $C_{min}(t)$ evaluados mejoraron su capacidad de discriminación de prácticas de manejo contrastantes y la correlación con el resto de las variables edáficas estudiadas a medida que se incrementó el tiempo de incubación. De acuerdo con los resultados obtenidos, bastaría con la determinación del CO_2 emitido durante 4 ó 6 días de incubación aeróbica para poder tener una indicación confiable del estado de la salud del suelo. La determinación es de muy bajo costo y no requiere de instrumental sofisticado. Si bien en este trabajo el CO_2 emitido fue determinado con un cromatógrafo de gases, la determinación puede ser realizada de una manera mucho más sencilla y barata (Franzluebbers et al., 2000) haciéndola más accesible para laboratorios de suelos estándar. No obstante, es necesario continuar con la evaluación de este parámetro edáfico para una mayor variedad de situaciones agroecológicas y de situaciones de uso y manejo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de la Tesis Doctoral del primer autor en el marco del Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de la Universidad Nacional de Mar del Plata (proyectos AGR653/21 y AGR689/22), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2019-RIST-I503) y del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2021-I-INVI-00619).

REFERENCIAS

- Aparicio, V. y Costa, J. L. (2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 96, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.006>
- Bassi, L., Tourn, S., Wyngaard, N., García, G. V., Crespo, C., Carciochi, W. D., Rivero, C., Sainz Rozas, H. R. y Studdert, G. A. (2022). Respiración en muestras de suelo re-humedecidas como indicador de salud edáfica. En: M. Castiglioni, P. Fernández y S. Vangeli (Eds.), *Actas XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* (pp 994-998). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Beare, M., Cabrera, M., Hendrix, P. y Coleman, D. (1994). Aggregate-protected and unprotected organic matter pool in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society America Journal*, 58(3), 787-795. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030021x>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., de Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuypers, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W. y Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cafaro-La-Menza, F. y Carciochi, W. D. (2023). Catch crops in the Argentinean Pampas: a synthesis-analysis on nutrient characteristics and their implications for a sustainable agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1244057. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1244057>
- Cambardella, C. y Elliott, E. (1992). Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Cates, A., Ruark, M., Hedtcke, J. y Posner, J. (2016). Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 155, 371-380. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.09.008>
- Crespo, C., O'Brien, P., Nunes, M. R., Ruis, S. J., Emmett, B. D., Rogovska, N., Malone, R. W., Cambardella, C. y Kovar, J. L. (2024). Contrasting soil management systems had limited effects on soil health and crop yields in a North Central US Mollisol. *Soil Science Society of America Journal*, 1-13. <https://doi.org/10.1002/saj2.20716>
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, L., Drinkwater, L. E., Franzluebbers, A. J., Glover, J. D., Grandy, A. S., Lee, J., Six, J., Maul, J. E., Mirsky, S. B., Spargo, J. J. y Wander, M. M. (2012). Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of America*, 76(2), 494-504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Green, J. M. y Gentry, L. E. (2013). Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. *Agronomy Journal*, 105(29), 493-502. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0382>
- Curtin, D., Beare, M. H., Scott, C. L., Hernández-Ramírez, G. y Meenken, E. D. (2014). Mineralization of soil carbon and nitrogen following physical disturbance: a laboratory assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 925-935. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.12.0510>
- Diovisalvi, N. V., Studdert, G. A., Reussi-Calvo, N., Domínguez, G. F. y Berardo, A. (2014). Estimating soil particulate organic carbon through total soil organic carbon content. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 85-94. http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_32n1/85-94%20pags%201CS%20289%20Diovisalvi%202014.pdf
- Domínguez, G. F., Diovisalvi, N. V., Studdert, G. A. y Monterubbianesi, M. G. (2009). Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on Mollisols of the Southeastern Pampas. *Soil and Tillage Research*, 102, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.020>
- Domínguez, G., García, G., Studdert, G., Agostini, M., Tourn, S. y Domingo, M. (2016). Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil quality/health indicator? *Spanish Journal of Soil Science*, 6, 82-97. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2016.V6.N2.01>
- Ernst, O. y Siri-Prieto, G. (2009). Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*, 105, 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.08.001>
- Franzluebbers, A. J. (2016). Should soil testing services measure soil biological activity? *Agricultural and Environmental Letters*, 1, 150009. <https://doi.org/10.2134/aerl2015.11.0009>
- Franzluebbers, A. J. (2020). Soil carbon and nitrogen mineralization after the initial flush of CO₂. *Agricultural and Environmental Letters*, 5, e20006. <https://doi.org/10.1002/aerl.20006>
- Franzluebbers, A. J. y Hendrickson, J. R. (2024). Should we consider integrated crop-livestock systems for ecosystem services, carbon sequestration, and agricultural resilience to climate change? *Agronomy Journal*, 116(2), 415-432. <https://doi.org/10.1002/agj2.21520>
- Franzluebbers, A., Sawchik, J. y Taboada, M. (2014). Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotation in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 190, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W., Schomberg, H. H. y Hons, F. M. (2000). Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 613-623. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642613x>
- García, G. V., Tourn, S. N., Roldán, M. F., Mandiola, M. y Studdert, G. A. (2020a). Simplifying the determination of aggregate stability indicators of Mollisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(4), 481-490. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1717513>
- García, G. V., Wyngaard, N., Reussi-Calvo, N. I., San Martino, S., Covacevich, F. y Studdert, G. A. (2020b). Soil survey reveals a positive relationship between aggregate stability and anaerobic mineralizable nitrogen. *Ecological Indicators*, 117, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106640>
- González-Sosa, M., Sierra, C. A., Quincke, J. A., Baethgen, W. E., Trumbore, S. y Pravia, M. V. (2024). High capacity of integrated crop-pasture

- systems to preserve old soil carbon evaluated in a 60-year-old experiment. *Soil*, 10, 467–486. <https://doi.org/10.5194/soil-10-467-2024>
- Haney, R. L., Brinton, W. H. y Evans, E. (2008). Estimating soil carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39, 2706-2720. <https://doi.org/10.1080/00103620802358862>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (s.f.). *Agrometeorología Balcarce*. INTA. Recuperado en febrero de 2014, de <https://inta.gob.ar/paginas/agrometeorologia-balcarce>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (1979). *Cartas de suelo de la República Argentina. Hoja 3757-31 Balcarce, Argentina*. INTA.
- Keeney, D. R. (1982). Nitrogen-availability indexes. En A. L. Page, R. H. Miller y D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2*. (2a ed., pp. 711-733). Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy – Soil Science Society of America.
- Keeney, D. R. y Nelson, D. W. (1982). Nitrogen inorganic forms. En A. L. Page, R. H. Miller y D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2*. (2a ed., pp. 643-698). Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy – Soil Science Society of America.
- Ladoni, M., Basir, A. y Kravchenko, A. (2015). Which soil carbon fraction is the best for assessing management differences? A statistical power perspective. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 848–857. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.10.0426>
- Lal, R. (2019). Eco-intensification through soil carbon sequestration: Harnessing ecosystem services and advancing sustainable development goals. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74, 55A-61A. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.3.55a>
- Mikha, M. y Rice, C. (2004). Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 809-816. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.8090>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W. y Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework* (3.2 ed.). Cornell University.
- Nelson, D. y Sommers, L. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En A. L. Page, R. H. Miller y D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2*. (2a ed., pp. 539-579). Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy – Soil Science Society of America.
- Novelli, L., Caviglia, O. y Píñero, G. (2017). Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stock. *Soil and Tillage Research*, 165, 128-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.08.008>
- Ogle, S. M., Alsaker, C., Baldock, J. F., Bernoux, M., Breidt, F. J., McConkey, B., Regina, K. y Vázquez-Amabile, G. G. (2019). Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Science Reports*, 9, 11665. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Olsson, L., Cotrufo, F., Crews, T., Franklin, J., King, A., Mirzabaev, A., Scown, M., Tengberg, A., Villarino, S. y Wang, Y. (2023). The State of the World's Arable Land. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 451–75. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-113741>
- Powelson, D., Stirling, c., Jat, m., Gerard, B., Palm, C., Sánchez, P. y Cassman, K. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 678-673. <https://doi.org/10.1038/nclimate2292>
- Puget, P. y Lal, R. (2005). Soil organic carbon and nitrogen in a mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research*, 80, 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.018>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. y Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reussi Calvo, N. I., Wyngaard, N., Orcellet, J. M., Sainz-Rozas, H. R. y Echeverría, H. E. (2018). Predicting field-apparent nitrogen mineralization from anaerobically incubated nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 502–508. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.11.0395>
- Rivero, C., Tourn, S. N., García, G. V., Videla, C. C., Domínguez, G. F. y Studdert, G. A. (2020). Nitrogen mineralized in anaerobiosis as indicator of soil aggregate stability. *Agronomy Journal*, 112(1), 592-607. <https://doi.org/10.1002/agj2.20056>
- Rodríguez, S., Baeza, M. D., García, G. V., Domínguez, G. F., Clemente, N. L. y Studdert G. A. (2022). Permanganate oxidizable carbon, new soil health indicator for Mollisols of the southeastern Argentinean Pampas? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2070631. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2070631>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. y Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79, 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sheehy, J., Regina, K., Alakuku, L. y Six, J. (2015). Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems *Soil and Tillage Research*, 150, 107-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.01.015>
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy*. (12a ed.). United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- Studdert, G. A., Echeverría, H. E. y Casanovas, E. M. (1997). Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typical argiudoll. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1466-1472. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100050026x>

- Studdert, G. A., Domingo, M. N., García, G. V., Monterubbianesi, M. G. y Domínguez, G. F. (2017). Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 285-300. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/volumen3522017/285-300%20p%C3%A1gs%20CS%20481%20Studdert%20et%20al%20nov%2027.pdf>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Soil Science*, 66(1), 55-94.
- Tourn, S. N. (2020). *Distribución y protección física de la materia orgánica en un molisol del Sudeste Bonaerense: efecto de sistemas de cultivos* [Tesis de Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata]. Base IPUIB, Unidad Integrada Balcarce. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/8272>
- Tourn, S. N., Videla, C. C. y Studdert, G. A. (2019). Ecological agriculture intensification through crop-pasture rotations does improve aggregation of Southeastern-Pampas Mollisols. *Soil and Tillage Research*, 195, 104411. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104411>
- Tourn, S. N., Videla, C. C. y Studdert, G. A. (2022). Actividad microbiológica global como indicador de salud edáfica en molisoles del Sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 40(1), 67-80. <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/Volumen40n1/689-FINAL%20Texto%20del%20art%C3%ADculo-3893-1-6-20211206.pdf>

