

## Cambios en la porosidad del suelo asociados a la fertilización con purín porcino

Àngela D. Bosch-Serra<sup>1,\*</sup>, Noemí Mateo-Marín<sup>1</sup>, María Gabriela Molina<sup>2</sup>, Rosa M. Poch<sup>1</sup> y Montserrat M. Boixadera-Bosch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Medio Ambiente y Ciencia del Suelo, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universitat de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure 191, E-25198, Lleida, España

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Córdoba. Avenida de la Armada Argentina 3555, Córdoba, Argentina

### Resumen

En zonas de secano del Valle del Ebro (España), la siembra directa y el uso de deyecciones ganaderas resultan interesantes para reducir costes. Este trabajo tiene como objetivo evaluar, bajo siembra directa de cereal de invierno, el efecto de la fertilización con purines porcinos en la porosidad del horizonte superficial de un suelo de textura franco-limosa. Se establecieron seis dosis de purín, además de un control. El suelo se clasificó como Xerofluvent típico. La porosidad del suelo, sin alterar su estructura, se estudió mediante técnicas micromorfológicas. Los muestreos se realizaron en mayo. Se obtuvieron 21 muestras inalteradas de suelo (0-0,06 m de profundidad) que fueron tratadas hasta obtener láminas delgadas de 5 cm de alto, 13 cm de largo y 30  $\mu\text{m}$  de grosor de las que se fotografiaron dos campos (3,15 cm  $\times$  4,2 cm). Los poros se estudiaron mediante análisis de imagen, clasificándose en diferentes intervalos de diámetros aparentes (DA), desde 15  $\mu\text{m}$  hasta 400  $\mu\text{m}$ . Se estableció una relación cuadrática significativa entre la cantidad de N aportada y el porcentaje de poros en los DA entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  (de 3,4 % a 5,2 % de porosidad total). A pesar de la detección de compactación y de la presencia de una estructura laminar, estos cambios en la porosidad responden a una mejora de la estructura, que podría deberse al hecho de facilitar la actividad de la macrofauna. Esta mejora estructural no se observa en aportaciones de purines inferiores a 100 kg N·ha<sup>-1</sup> ni en las aportaciones más altas, próximas a 300 kg N·ha<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Cereal de invierno, compactación, estructura del suelo, micromorfología de suelos, secano, siembra directa.

### Soil porosity changes associated with pig slurry fertilisation

#### Abstract

In dryland Mediterranean areas, the usage of slurries and no-till are encouraged to reduce costs. Implementation of these practices is a challenge since they may make soil susceptible to a reduction in its physical quality (particularly through compaction). This paper aims to evaluate the effect of pig slurry fertilisation on superficial soil porosity when no-tillage is used in silty-loam soil. Winter cereal was fertilised with pig slurry at six rates. There was also a non-nitrogen treatment (control). The soil was clas-

---

\* Autor para correspondencia: [angela.bosch@udl.cat](mailto:angela.bosch@udl.cat)

sified as a Typic Xerofluent. Soil porosity was studied within unaltered soil samples with a micromorphological approach. Soil samples were collected in May. From undisturbed soil samples (0-0.06 m depth), twenty-one thin sections (5 cm × 13 cm × 30 μm) were obtained and photographed into two areas of 3.15 cm × 4.20 cm. Pores were studied using image analysis and they were classified at different intervals of apparent pore diameter (APD) from >15 μm up to 400 μm. Photography analysis showed porosity changes at 200-400 μm of APD. In this interval, there was a quadratic relationship between nitrogen rate and percentage of pores (from 3.4 % to 5.2 % of total porosity). Even though the soil was compacted and had a laminar structure, these porosity changes were associated with an improvement of the soil structure. This positive consequence could be caused by the activity of the macrofauna. This effect was only detected when pig slurry was applied at agronomic rates and it was not observed in slurry treatments below 100 kg N·ha<sup>-1</sup> nor close to 300 kg N·ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Compaction, no-tillage, rainfed, soil micromorphology, soil structure, winter cereal.

## Introducción

A escala mundial y en el periodo de 1999 a 2013, la siembra directa (no laboreo o labranza cero) se expandió a un ritmo anual de 7,5 millones de hectáreas (Bashour *et al.*, 2016). En 2021, esta técnica de manejo del suelo estaba implementada en un 15 % de la superficie cultivada del mundo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021). La zona en la que la siembra directa está más extendida es en América del Sur (se practica en un 45 % de la superficie agrícola) y en Estados Unidos (32 % de la superficie agrícola). En Europa, a diferencia del continente americano, la labranza cero sigue siendo minoritaria. España contó con 768.173 ha bajo no laboreo durante 2020 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020).

El motivo de la expansión de la labranza cero no responde, en la mayoría de casos, a una sensibilización medioambiental. En realidad, se trata de una tendencia con un marcado carácter económico puesto que ayuda a reducir los costes de combustible (Sánchez-Girón *et al.*, 2004 y 2007).

Más allá de su impacto positivo respecto a la reducción de costes, la siembra directa puede mejorar la estructura del suelo en la capa más superficial (entre 5 cm y 10 cm) debido a la estratificación de la materia orgánica y,

a largo plazo, puede favorecer la macroporosidad (Blanco-Canqui y Ruis, 2018). La estructura del suelo y su porosidad son dos características físicas esenciales para determinar la capacidad del suelo para sostener la actividad agrícola, dada su importancia sobre el control de la erosión, en el enraizamiento de las plantas (Rabot *et al.*, 2018), y en el almacenamiento/dinámica de agua en el suelo que es un factor limitante en condiciones de secano (Bescansa *et al.*, 2006).

En contraposición, numerosos análisis micromorfológicos (Ball y Robertson, 1994; Morrás y Bonel, 2005; Sasal *et al.*, 2006) demuestran que, bajo no laboreo y en la capa superficial del suelo, se desarrollan más fácilmente agregados laminares y poros planares; características asociadas a la compactación del suelo. En el caso de los suelos limosos, las potenciales ventajas de la siembra directa pueden también reducirse si el clima es árido o semiárido (Van den Putte *et al.*, 2010), por ser más susceptibles a procesos de compactación.

No obstante, el resultado final sobre la calidad física del suelo depende de otros factores. Así, bajo no laboreo pero con una rotación de cultivos que incluya una mayor proporción de gramíneas (por ejemplo trigo y maíz) frente al predominio de la soja se favorece el desarrollo de bioporos radiculares y la actividad de la fauna (Behrends-Kraemer y Morrás, 2018).

Aparte de las características físicas mencionadas, existen los llamados "bioindicadores" o seres vivos (como las lombrices de tierra) que dan información por su presencia, su ausencia o su comportamiento, de las condiciones edáficas de una zona (Van Gestel y Van Brummelen, 1996). VandenBygaart et al. (1999) observaron que el paso del laboreo a la labranza cero supuso un aumento de la presencia de *Lumbricus terrestris*, hecho que tiene un impacto directo positivo sobre la agregación del suelo, su porosidad y la infiltración del agua.

Asimismo, los oribátidos (los primeros responsables de la transformación de la materia orgánica en el suelo) pueden ser analizados como bioindicadores y, en casos específicos, relacionarlos con la cantidad de purín aplicada en los terrenos en los que se encuentran. El aporte de purines es beneficioso para la población de oribátidos pero dosis excesivas comportan la reducción de especies y del número de estos artrópodos (Bosch-Serra et al., 2014).

La hipótesis de este trabajo es que bajo siembra directa, el efecto positivo de la aplicación de purín (estrechamente relacionado con la cantidad de nitrógeno que contiene) tiene un límite en cuanto a la dosis aplicada que pudiera revertir en una mejora de la porosidad del suelo y de la actividad de la macrofauna (desarrollo de galerías) asociadas. El objetivo de este artículo es determinar la influencia de la dosis de purín en el diámetro aparente de poros.

## Material y métodos

### Ubicación del experimento

Este estudio se llevó a cabo en una parcela experimental en Oliola, España (41° 52' 29" N, 01° 09' 10" E, 443 m. s.n.m.). El suelo se clasificó como Xerofluvent típico (Soil Survey

Staff, 2014). La capa superficial (0-0,3 m) presenta una estructura débil en bloques angulares. La textura del suelo es franco-limosa (clasificación USDA) con porcentajes de arena, limo y arcilla que alcanzan el 13,1 %, 60,9 % y 26,0 %, respectivamente. Los minerales arcillosos predominantes son la illita y la clorita. El pH es básico (8,2; 1:2,5 suelo:agua), no salino con baja conductividad eléctrica (CE 1:5 suelo:agua 0,18 dS·m<sup>-1</sup> a 25 °C) y el contenido de carbonato de calcio es alto (300 g·kg<sup>-1</sup>). El valor de materia orgánica es bajo (~20 g·kg<sup>-1</sup>) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es de 11,1 cmol<sup>+</sup>·kg<sup>-1</sup>.

El área de estudio se halla bajo un clima mediterráneo seco con temperaturas medias altas en verano (>20 °C), precipitaciones anuales bajas (<450 mm·año<sup>-1</sup>) y valores elevados (1.013 mm·año<sup>-1</sup>) de evapotranspiración del cultivo de referencia (calculada según la ecuación de Penman-Monteith).

### Diseño del experimento

Se disponía de un experimento establecido en el año 2002 en donde los tratamientos fertilizantes se repetían anualmente a excepción de la campaña 2007-2008 que se mantuvo en barbecho. Tres años antes del inicio de este trabajo (2012) se había introducido la siembra directa (dividiendo en dos las parcelas experimentales). Para este estudio se muestrearon parcelas de labranza cero bajo distintos tratamientos de fertilización en donde se aplicaban purines de cerdo de engorde (Tabla 1). El tratamiento de 135 kg N·ha<sup>-1</sup>, el de 202 kg N·ha<sup>-1</sup> y el de 216 kg N·ha<sup>-1</sup> (C13, C20 y C22, respectivamente) se aplicaban en el ahijado del cereal de invierno en una única dosis en cobertera; el tratamiento de 176 kg N·ha<sup>-1</sup> se aplicaba en presiembra del cereal (S18) en una única dosis y los tratamientos de 289 kg N·ha<sup>-1</sup> y de 311 kg N·ha<sup>-1</sup> se aplicaban fraccionados entre presiembra y ahijado del cereal (I29 e I31,

Tabla 1. Tratamientos de fertilización con purín porcino en base a las cantidades de nitrógeno total (NT), nitrógeno amoniacal (NA), fósforo (P), potasio (K) y materia orgánica (MO) aplicadas. Se incluye el rendimiento en grano en la cosecha (mes de junio). El significado de los acrónimos de los tratamientos indican: S: aplicación de fertilizante en siembra, los números indican la dosis de N aplicada de 0 o 176 kg N·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>; C, fertilizante aplicado en ahijado del cereal, los números indican la dosis de N aplicada de 135, 202 o 216 kg N·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>; I: aplicación de fertilizante fraccionada entre la siembra (176 kg N) y el ahijado del cereal, los números indican la cantidad total de N aplicada de 289 o 311 kg N·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.  
*Table 1. Pig slurry fertilisation treatments with their values of total nitrogen, ammonium nitrogen (NA), phosphorous (P), potassium (K) and organic matter (MO) applied. Yields obtained at June harvest are included. The acronyms of treatment means: S, fertiliser applied at sowing, numbers indicate the N rates applied of 0 or 176 kg N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>; C, fertiliser applied at cereal tillering, numbers indicate the N rates applied of 135, 202 or 216 kg N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>; I, fertiliser divided between sowing (176 kg N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>) and cereal tillering, numbers indicate the total N rate applied rate of 289 and 311 kg N·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>.*

Tratamiento	NT (kg·ha <sup>-1</sup> )	NA (kg·ha <sup>-1</sup> )	P (kg·ha <sup>-1</sup> )	K (kg·ha <sup>-1</sup> )	MO (kg·ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg·ha <sup>-1</sup> )
S00	0	0	42	89	0	2080
C13	135	93	57	48	1425	4463
S18	176	106	57	157	1943	4466
C20	202	140	85	71	2134	5011
C22	216	146	64	133	2111	5185
I29	289	181	94	223	3101	5199
I31	311	199	115	205	3368	4744

respectivamente). Además, se muestreó un control, en el que no se aplicó nitrógeno (S00) aunque sí fósforo y potasio en presiembra (Tabla 1). La aplicación de purines antes de la siembra mediante el método del abanico se realizó el 26 de octubre de 2011 y la cobertura el 7 de marzo de 2012. Los purines presentaban un contenido materia orgánica de 664 g·kg<sup>-1</sup> y 725 g·kg<sup>-1</sup> sobre materia seca, respectivamente.

### Estudio micromorfológico

En mayo de 2012 y para cada uno de los siete tratamientos se extrajo un prisma de la superficie del suelo de 6 cm en profundidad, 9 cm de ancho y 19 cm de largo. Como la parcela experimental estaba compuesta por tres

bloques (tres réplicas para cada uno de los tratamientos) se obtuvieron un total veintinueve prismas rectangulares de suelo inalterado.

De cada uno de estos prismas se fabricó una lámina delgada horizontal siguiendo el procedimiento indicado por Benyarku y Stoops (2005). Los prismas se secaron al aire, se impregnaron con resina de poliéster con un colorante fluorescente a la luz ultravioleta (Uvitex®) y se cortaron en bloques, obteniendo las láminas delgadas de 5 cm de alto, 13 cm de longitud y 30 µm de grosor. Estas láminas se estudiaron mediante un microscopio petrográfico. Se describió la tipología de poros: vesículas, bioporos, poros de empaquetamiento, huecos planares y cavidades mediante análisis visual en base al criterio morfológico de Stoops (2003).

Por cada una de las láminas se fotografiaron dos campos de 3,15 cm de alto y de 4,2 cm de largo. Para ello, se usó una cámara Olympus® C-7070 Wide Zoom. Se analizaron un total de 42 campos (dos por cada una de las 21 láminas). De cada campo se extrajeron tres imágenes a través de distintos tipos de iluminación: i) luz polarizada transmitida, ii) luz polarizada transmitida bajo polarizadores cruzados (usando papel polarizado) e iii) luz incidente ultravioleta (UV). La última de estas imágenes se binarizó usando el software ImageJ® desarrollado por Ferreira y Rasband (2012). Los dos primeros tipos (84 imágenes) se usaron como controles visuales de la calidad de la binarización en blanco y negro de las 42 imágenes obtenidas con luz UV. Si se detectaba algún error, este se corregía manualmente. En todos los casos, se eliminó el ruido de fondo (rasgos por debajo de 1 píxel). La porosidad asociada a distintos intervalos de diámetros aparentes (DA) de poros se obtuvo mediante un algoritmo a partir de los trabajos de Vogel (2008). Los intervalos estudiados fueron: 15-30  $\mu\text{m}$ , 30-60  $\mu\text{m}$ , 60-100  $\mu\text{m}$ , 100-200  $\mu\text{m}$  y 200-400  $\mu\text{m}$ .

### **Análisis estadístico**

La porosidad fraccionada en los distintos intervalos de diámetro aparente se analizó en relación a la cantidad total de nitrógeno aplicada. Se ajustó un modelo de regresión polinomial utilizando el paquete estadístico SAS v9.4 (SAS Institute Inc., 2002-2012).

### **Resultados**

A través del análisis visual de las láminas delgadas, se comprobó que el suelo estudiado presentaba en todos los tratamientos una estructura laminar (Figuras 1, 2 y 3), la cual se asocia a un fenómeno de compactación tras tres años en condiciones de siembra directa.

Sin embargo, los poros planares o fisuras horizontales asociados a la estructura laminar no tenían un grado elevado de acomodación, es decir, estaban deformados y sus paredes no "casaban", debido a que, en algunos puntos, se observaba su uso por la fauna y la creación de cámaras a partir de esas fisuras e incluso se observaban canales verticales que los atravesaban.

El porcentaje de porosidad para el intervalo de diámetro aparente de poros comprendido entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  y en función del N aplicado (Figura 4) se ajustó a una relación cuadrática significativa ( $p = 0,049$ ;  $R^2 = 0,779$ ).

La aplicación de purín porcino a partir de una dosis equivalente a 100 kg N·ha<sup>-1</sup> favoreció el incremento de poros de diámetro aparente entre 200-400  $\mu\text{m}$ , pero la tendencia positiva se invirtió cuando se superaron los 200 kg N·ha<sup>-1</sup>.

En cambio, no se observó una relación significativa entre la dosis de N aplicada con el purín y el porcentaje de poros del suelo dentro de los demás intervalos de diámetro aparente: 15-30  $\mu\text{m}$ , 30-60  $\mu\text{m}$ , 60-100  $\mu\text{m}$  y 100-200  $\mu\text{m}$  estudiados. Los datos se muestran en la Tabla 2.

### **Discusión**

En suelos de textura franco-limosa, como es el caso de este estudio, la compactación es un proceso muy frecuente y que puede agravarse con la siembra directa (Çelik et al., 2019; Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003). En este estudio, la presencia de compactación se corrobora por la estructura laminar que se observa en los primeros centímetros del suelo en el tratamiento control (Figura 1).

La adición de materia orgánica favorece la macroporosidad y la conectividad entre poros (Zhang et al., 2012). Los purines porcinos en

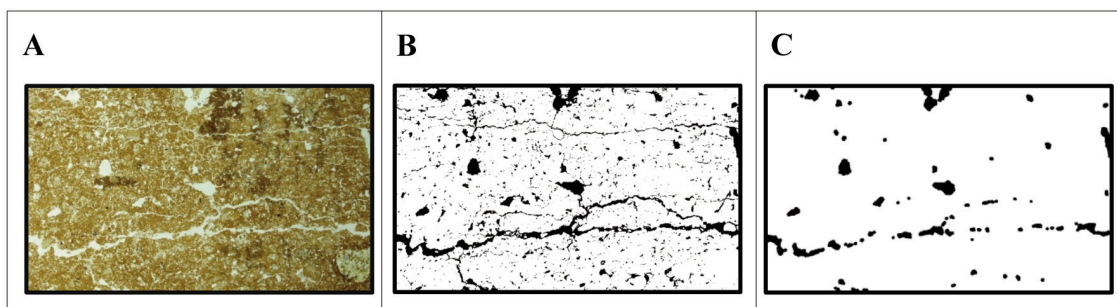


Figura 1. Tratamiento control sin aplicación de fertilizante nitrogenado (S00): A, imagen original; B, porosidad en color negro; C, porosidad en el intervalo de 200  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$ .

Figure 1. Control treatment without nitrogen fertiliser (S00): A, original image; B, porosity marked in black; C, porosity between 200  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$ .

Tabla 2. Porosidad (%) en distintos intervalos de diámetro aparente según distintos tratamientos de fertilización y en relación al área estudiada en cada lámina delgada.

Table 2. Porosity fractions (%) for different intervals of pore apparent diameter according to different fertilization treatments. Porosity fraction percentages are referred to the areas studied in each thin section.

Tratamiento	>15 $\mu\text{m}$	15-30 $\mu\text{m}$	30-60 $\mu\text{m}$	60-100 $\mu\text{m}$	100-200 $\mu\text{m}$
S00	15,82	0,76	1,51	2,46	4,04
C13	19,93	0,83	1,15	2,38	5,08
S18	17,56	0,57	1,93	2,95	5,28
C20	17,25	0,93	1,13	2,65	5,41
C22	15,93	1,12	0,26	1,44	3,45
I29	14,87	0,91	0,91	1,78	3,55
I31	16,31	0,95	1,17	2,02	3,26

cuanto a materia orgánica (MO) presentan valores bajos (Yagüe et al., 2012; Tabla 1) pero en este trabajo se ha observado que el uso de purines a dosis máximas de N de origen orgánico (170 kg N·ha<sup>-1</sup>) recomendadas en las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos o recomendadas en otras áreas no calificadas como vulnerables (por ejemplo, 210 kg N·ha<sup>-1</sup>; DOCE, 1991; DOGC, 2009) puede mejorar la estructura del suelo. Este efecto de mejora se per-

cibe por el desarrollo de una estructura en bloques subangulares y en la aparición de poros planares no acomodados (deformados por actividad de la fauna) tras una aplicación continuada en el tiempo de purín porcino con un posible efecto acumulador de pequeñas cantidades de materia orgánica.

En este trabajo, el incremento de porosidad entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  se asocia al desarrollo de poros planares cuando las aportaciones de N total mediante purines porcinos se si-



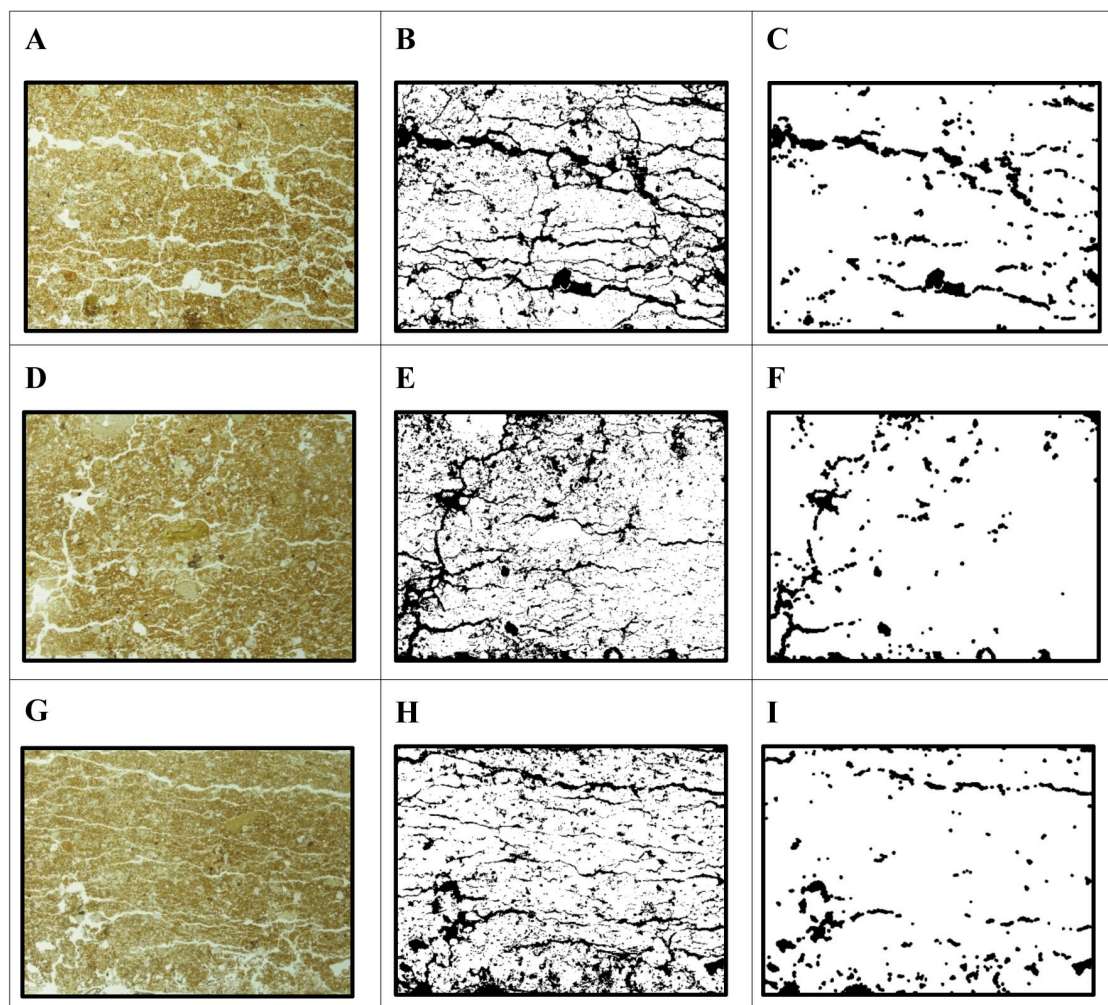


Figura 2. Imágenes de láminas delgadas (A, D, G), porosidad en color negro (B, E, H) y porosidad de 200  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$  (C, F, I) en los siguientes tratamientos con purines porcinos (C13, S18 y C20, respectivamente): 135  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (A, B, C), 176  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (D, E, F) y 202  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (G, H, I).

*Figure 2. Images from horizontal thin sections (A, D, G), porosity marked in black (B, E, H) and porosity between 200  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$  (C, F, I) from the following pig slurry treatments (C13, S18, and C20, respectively): 135  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (A, B, C), 176  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (D, E, F) and 202  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (G, H, I).*

túan en el intervalo de 100-200  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $<3 \text{ Mg MO}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ; Tabla 1). Estos poros, principalmente con orientación horizontal, son aprovechados por la fauna para crear canales, por lo tanto deben considerarse estables para que la fauna los utilice. A pesar

de tratarse de estructuras laminares, la fauna es capaz, de forma temporal, de crear canales verticales que en algunos sectores transforma la estructura en bloques subangulares. No se observa tal desarrollo de estructura en las aportaciones menores de 100  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  ni

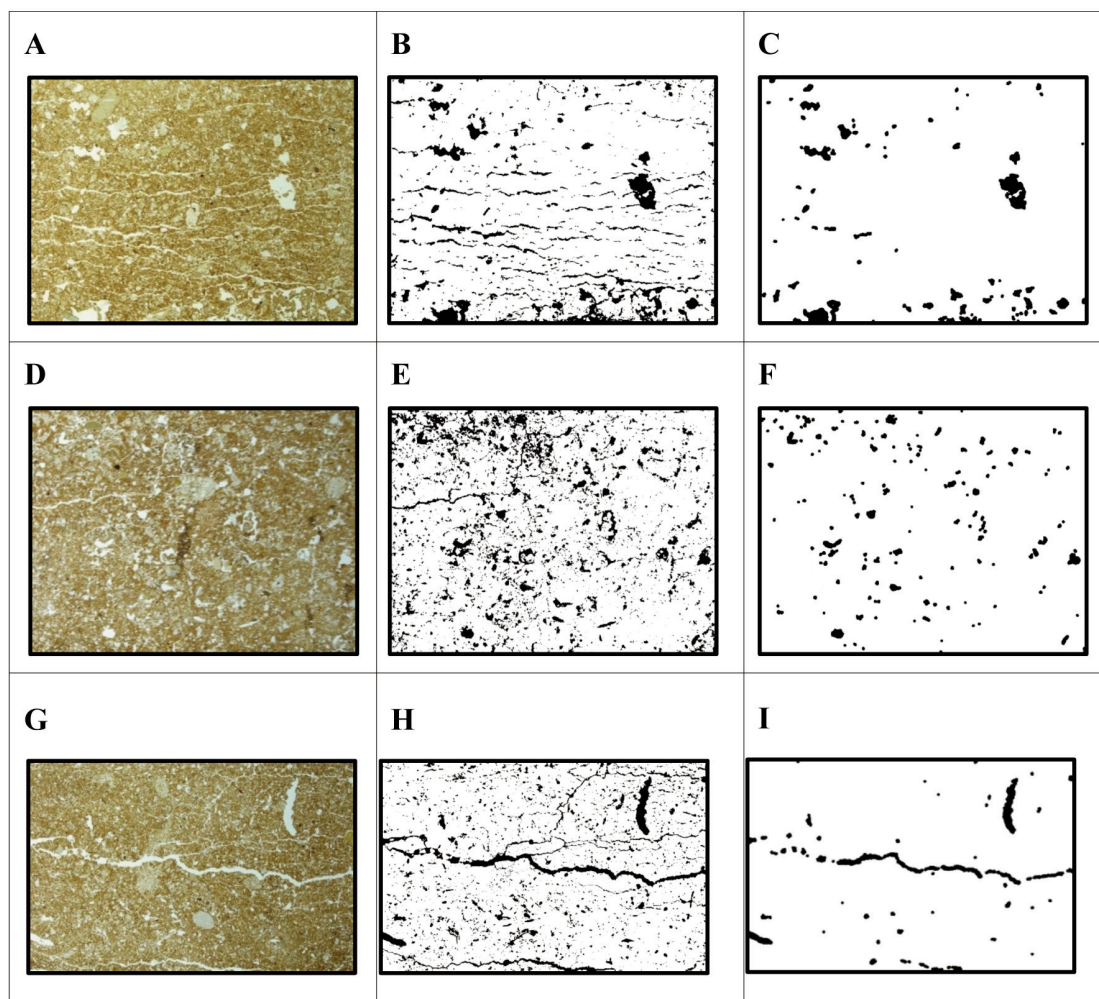


Figura 3. Imágenes de láminas delgadas (A, D, G), porosidad en color negro (B, E, H) y porosidad de 200  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$  (C, F, I) en los tratamientos con purines porcinos (C22, I29 y I31, respectivamente): 211  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (A, B, C), 289  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (D, E, F) y 311  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (G, H, I).

Figure 3. Images from horizontal thin sections (A, D, G), porosity marked in black (B, E, H) and porosity between 200  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$  (C, F, I) from the following pig slurry treatments (C22, I29, and I31, respectively): 211  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (A, B, C), 289  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (D, E, F), and 311  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  (G, H, I).

en las que se encuentran alrededor de 300  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Un aumento de la bioturbación causada por las lombrices de tierra tras la aplicación de purín porcino también ha sido detectado por otros autores (Valdez et al., 2019) a dosis similares (96  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Esta dosis (umbral inferior de aplicación) estaría

asociada a una mínima cantidad de MO adicional ( $\sim 1,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , Tabla 1) efectiva para incidir sobre una mejora de la calidad física del suelo. Ello se traduciría también en que puede contribuir al incremento de las producciones (Tabla 1) siguiendo la ley de Mitscherlich o ley de los rendimientos menos



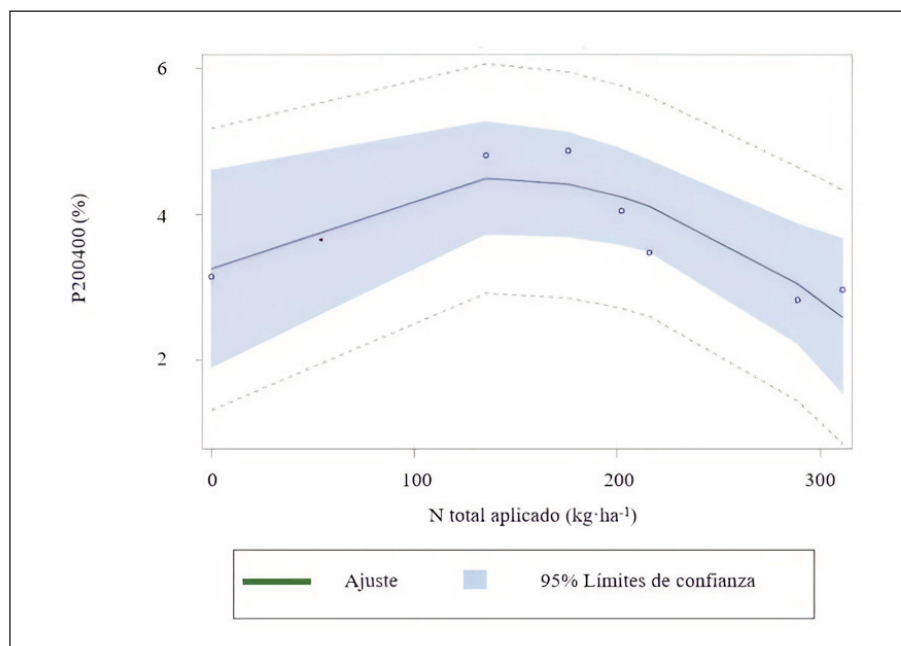


Figura 4. Porosidad del suelo (%) entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  (P200400) y en los primeros 5 cm en función del N total aplicado anualmente en forma de purín porcino ( $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y en un cultivo de cereal de invierno. La relación es significativa ( $p = 0,049$ ); así como la estimación de los parámetros de la ecuación:  $y = ax + bx^2 + c$ ; ( $a = 0,01787$ ;  $p = 0,0406$ ), ( $b = -0,00006420$ ;  $p = 0,0236$ ), ( $c = 3,24688$ ;  $p = 0,0026$ ).

Figure 4. Porosity of the soil (%) between 200  $\mu\text{m}$  and 400  $\mu\text{m}$  (P200400) and within the first 0.05 m depth, plotted against the total annual N applied as pig slurry ( $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) on a winter cereal crop. The relationship is significant ( $p = 0.049$ ), as well as the estimation of the equation's parameters:  $y = ax + bx^2 + c$ ; ( $a = 0.01787$ ;  $p = 0.0406$ ), ( $b = -0.00006420$ ;  $p = 0.0236$ ), ( $c = 3.24688$ ;  $p = 0.0026$ ).

que proporcionales, de manera que a medida que se aumenta la cantidad aplicada de fertilizante, el aumento de producción que se obtiene es cada vez menor.

El incremento de la macroporosidad en el intervalo 200-400  $\mu\text{m}$  podría verse negativamente afectado por la aplicación de mayores dosis de N en forma amoniacal (~67 % de N aplicado) que perjudicarían la fauna del suelo. En el mismo experimento de Oliola (Valdez-Ibañez et al., 2019) y respecto a la actividad de las lombrices, ya se detectó que la especie anécica *Nicodrilus trapezoides* desaparecía en las parcelas que habían recibido en cobertera dosis elevadas de purín porcino (>265  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). También, en el caso de la es-

pecie de oribátidos *Oribatula connexa*, su población empezó a decaer cuando la aplicación de purines en siembra y en una sola dosis superaba los 200  $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  o aproximadamente al equivalente de 140  $\text{kg N-NH}_4^+\cdot\text{ha}^{-1}$  (Bosch-Serra et al., 2014). En las condiciones del ensayo, también podría existir un efecto aditivo de otros componentes no analizados y probablemente asociados a la cantidad de materia orgánica aplicada (Valdez-Ibañez et al., 2019), ya que bajo siembra directa ésta no se incorpora en el suelo; es decir, no existiría en los primeros centímetros el efecto dilución en función de la profundidad de laboreo, lo que podría afectar negativamente al hábitat de la macrofauna.

El incremento de la porosidad en el intervalo entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  no es solamente un indicador de la mejora de la estructura del suelo, sino también de la mejora de la conectividad entre poros asociada a la actividad de la macrofauna, por lo que es de esperar que se facilite la circulación del agua a través del suelo y mejore el aprovechamiento de ésta por parte de la planta. La disponibilidad de agua es factor determinante en la producción de los cultivos en condiciones de secano de climas semiáridos.

### Conclusiones

En condiciones de siembra directa, la porosidad entre 200  $\mu\text{m}$  y 400  $\mu\text{m}$  se relaciona con la cantidad de N aplicada con el purín porcino. Estos cambios pueden expresarse, significativamente, a través de una curva polinómica de segundo grado. A efectos prácticos, dentro de un contexto en el que el suelo esté compactado y tenga una estructura laminar, la relación hallada apunta hacia la evolución de la forma estructural, esto es, hacia un incipiente desarrollo de una estructura en bloques subangulares. Esta mejora se observa cuando las aplicaciones anuales de purín porcino superan el equivalente a 100 kg N·ha<sup>-1</sup>, pero no rebasan el límite de 200 kg N·ha<sup>-1</sup>. La evolución positiva de la estructura podría atribuirse a la actividad de la macrofauna, actividad que se vería limitada tanto en las dosis bajas como en las dosis demasiado elevadas de purín.

### Agradecimientos

Las autoras de este trabajo agradecen a J.M. Llop su apoyo en los trabajos de campo, así como al Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural por el mantenimiento de la parcela experimental. Asimismo, se agradece la colaboración del labora-

torio de micromorfología de suelos de la Universitat de Lleida por haber facilitado la elaboración de las láminas delgadas. Este estudio ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria – INIA (proyectos RTA2010-126-C2-01, RTA2013-57-C5-01 y RTA2017-88-C3-03) y por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

### Referencias bibliográficas

- Ball BC, Robertson EAG (1994). Soil structural and transport properties associated with poor growth of oil-seed rape in soil direct drilled when wet. *Soil and Tillage Research* 31: 119-133. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90075-2).
- Bashour I, Al-Ouda A, Kassam A, Bachour R, Jouni K, Hansmann B, Estephan C (2016). An overview of conservation agriculture in the dry Mediterranean environments with a special focus on Syria and Lebanon. *AIMS Agriculture and Food* 1: 67-84. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2016.1.67>.
- Behrends-Kraemer F, Morras HJM (2018). Macroporosity of a Typic Argiudoll with different cropping intensity under no-tillage. *Spanish Journal of Soil Science* 8: 214-235. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N2.06>.
- Benyarku CA, Stoops G (2005). Guidelines for preparation of rock and soil thin sections and polished sections. En: *Quaderns DMACS*, 33. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida. Lleida, España. 83 pp.
- Bescansa P, Imaz MJ, Virto I, Enrique A, Hoogmoed WB (2006). Soil water retention as affected by tillage and residue management in semi-arid Spain. *Soil and Tillage Research* 87: 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028>.
- Blanco-Canqui H, Ruis SJ (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326: 164-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>.
- Bosch-Serra ÀD, Padró-Caminal Roc, Boixadera-Bosch R, Orobítz J, Yagüe-Carrasco MR (2014).

- Tillage and slurry over-fertilization affect oribatid mite communities in a semiarid Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology* 34: 124-139. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.06.010>.
- Çelik I, Günal H, Acara M, Acir N, Barut ZB, Budak M (2019). Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate. *Soil and Tillage Research* 185: 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.015>.
- Ferreira T, Rasband W (2012). ImageJ: User Guide. Disponible en: <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf> (Consultado: 17 de enero de 2022).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). General opens the 8th World Congress on Conservation Agriculture. Disponible en: <https://www.fao.org/news/story/it/item/1412745/icode/> (Consultado: 17 de enero de 2022).
- DOCE (1991). Directiva del Consejo (91/676/CEE) de 12 de diciembre de 1991 relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, núm L375, pp. 1-8.
- DOGC (2009). Decret 136/2009, d'1 de setembre, d'aprovació del programa d'actuació aplicable a les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats que procedeixen de fonts agràries i de gestió de les dejeccions ramaderes. *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*, núm. 5457, de 3 de setiembre de 2009, pp. 65858-65902.
- Lampurlanés J, Cantero-Martínez C (2003). Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal* 95: 526-536. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.5260>.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2020). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Análisis de las técnicas de mantenimiento del suelo y de los métodos de siembra en España. Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/cubiertas2020\\_tcm30-526244.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/cubiertas2020_tcm30-526244.pdf) (Consultado: 17 de enero de 2022).
- Morrás H, Bonel B (2005). Microstructure differentiation in a Typic Argiudoll in the Pampean Region of Argentina under conventional and no-till agricultural systems. Two converging pathways to a similar organic matter content. *Geophysical research abstracts* 7: 01337. <https://meetings.copernicus.org/www.cosis.net/abstracts/EGU05/01337/EGU05-J-01337.pdf> (Consultado: 17 de enero de 2022).
- Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel HJ (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>.
- Sánchez-Girón V, Serrano A, Hernanz JL, Navarrete L (2004). Economic assessment of three long-term tillage systems for rainfed cereal and legume production in semiarid central Spain. *Soil and Tillage Research* 78: 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.01.001>.
- Sánchez-Girón V, Serrano A, Suárez M, Hernanz J, Navarrete L (2007). Economics of reduced tillage for cereal and legume production on rainfed farm enterprises of different sizes in semiarid conditions. *Soil and Tillage Research* 95: 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.12.007>.
- SAS Institute Inc. (2002-2012). SAS/TAT. Software v 9.4. Ed. SAS, Cary, NC, EEUU. Disponible en: [https://www.sas.com/en\\_us/home.html](https://www.sas.com/en_us/home.html) (Consultado: 4 de noviembre de 2021).
- Sasal MC, Andriulo AE, Taboada MA (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.025>.
- Stoops G (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, EE.UU.* 256 pp.
- Valdez AS, Bosch-Serra ÀD, Yagüe MR, Poch RM, Puigpinós E (2019). Earthworm community and soil microstructure changes with long-term organic fertilization. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66: 957-970. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1648792>.
- Valdez-Ibañez AS, Bosch-Serra ÀD, Yagüe-Carrasco MR (2019). Fertilization with pig slurry:

- impacts on earthworms in rainfed agriculture. *Investigación Agraria* 21: 1-10. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2019.junio.1-10>.
- VandenBygaert AJ, Protz R, Tomlin AD, Miller JJ (1999). Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of south-western Ontario. *Soil and Tillage Research* 51: 139-149. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00050-1).
- Van den Putte A, Govers G, Diels J, Gillijns K, Demuzere M (2010). Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy* 2010: 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008>.
- Van Gestel CAM, Van Brummelen TC (1996). Incorporation of the biomarker concept in ecotoxicology calls for a redefinition of terms. *Ecotoxicology* 5: 217-225. <https://doi.org/10.1007/BF00118992>.
- Vogel HJ (2008). Quantim4 C/C++ Library for scientific image processing. UFZ – Helmholtz Center for Environmental Research, Helmholtz, Germany. Disponible en: [https://www.ufz.de/export/data/2/94413\\_quantim4\\_ref\\_manual.pdf](https://www.ufz.de/export/data/2/94413_quantim4_ref_manual.pdf) (Consultado: 17 de enero de 2022).
- Yagüe MR, Bosch-Serra AD, Boixadera J (2012). Measurement and estimation of the fertiliser value of pig slurry by physicochemical models: Usefulness and constraints. *Biosystems Engineering* 111: 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.013>.
- Zhang S, Li Q, Zhang X, Wei K, Chen L, Liang W (2012). Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research* 124: 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.007>.

(Aceptado para publicación el 8 de marzo de 2022)