

Rendimiento del cultivo ¿Qué efecto tienen la diversidad arvense y la microbiota del suelo?

What is the effect of weed diversity and soil microbiota on crop yield?

Eva Hernández Plaza^{1,*}, Fernando Bastida², Valle Egea Cobrero³, Jordi Izquierdo⁴, Sara Navarro³, Verónica Pedraza³ & José Luis González-Andújar³

¹ Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC), Madrid, España

² Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva, Huelva, España

³ Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC), Córdoba, España

⁴ Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia, Universitat Politècnica de Catalunya, Castelldefels, España

(*E-mail: eva.hernandez@inia.csic.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.35060>

Recibido/received: 2024.01.15

Aceptado/accepted: 2024.02.28

RESUMEN

En este trabajo analizamos la relación entre la abundancia y diversidad de especies arvenses, la microbiota del suelo y el rendimiento del cultivo en 26 campos de trigo con manejo ecológico o convencional. En cada campo, se registró la cobertura de cada una de las especies arvenses en 10 marcos (1m²), y el rendimiento del cultivo en esos mismos marcos y en otros cuatro controles que se habían mantenido sin hierbas. En todos los marcos se tomaron también muestras de suelo para obtener la abundancia de *amplicon sequence variants* (ASVs) de hongos y bacterias. Con estos datos se calculó la diversidad de especies arvenses y de géneros de hongos y bacterias (exp^H). Además, se obtuvo el rendimiento relativo del cultivo comparando marcos con y sin arvenses. Los campos ecológicos registraron mayor abundancia y diversidad de especies arvenses y de géneros de hongos. El rendimiento del cultivo se relacionó con la abundancia de plantas arvenses y con la diversidad fúngica, pero el efecto de estos factores difirió en función del tipo de manejo. En los campos ecológicos el rendimiento estuvo asociado positivamente a una mayor diversidad fúngica, mientras que lo contrario sucedió en campos convencionales. Por otra parte, el rendimiento en los campos convencionales disminuyó conforme la abundancia de vegetación arvense fue mayor, pero esta reducción fue menor en los campos ecológicos. El rendimiento relativo del cultivo se relacionó positivamente con la diversidad de las comunidades arvenses tanto en campos ecológicos como en campos convencionales. La concentración de proteína en el grano estuvo negativamente relacionada con el rendimiento del trigo, un efecto más acusado en los campos ecológicos.

Palabras clave: microbiota del suelo, rendimiento relativo, número efectivo de especies, diversidad.

ABSTRACT

We analysed the relationship between crop yield (quantity and quality) and the abundance and diversity of both weed communities and soil microbiota in 26 wheat fields managed conventionally or organically. In each field, we measured the cover of each weed species in 10 quadrats (1m²) and the crop yield in the same quadrats and in four other that were kept weed-free as controls throughout the field season. We also collected soil samples in every quadrat to obtain the abundance of fungi and bacteria amplicon sequence variants (ASVs). These data enabled us to compute the diversity of weed, fungi and bacteria communities (exp^H). We also obtain crop yield and the relative crop yield comparing quadrats with and without weeds. Organic management led to higher weed diversity and cover and to higher diversity of fungi genera. Crop yield was higher in conventional fields and was related to weed cover and to the diversity of fungi genera. However, these effects depended on field management. Crop yield in organic fields was less negatively impacted by weed cover and positively related to fungi diversity. Relative crop yield was positively related to weed diversity under both types of management. Protein concentration in wheat grains (yield quality) was negatively related to crop grain weight and this negative effect was stronger in organic fields.

Keywords: soil microbiota, relative crop yield, effective number of species, diversity.

INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha sugerido que manejos encaminados a diversificar las comunidades arvenses podrían reducir su impacto negativo sobre el rendimiento de los cultivos (MacLaren *et al.*, 2020). Así, Storkey & Neve (2018) mostraron que la pérdida de rendimiento de un trigo de invierno cultivado en Reino Unido (experimento a largo plazo de Rothamsted) causada por la vegetación arvense era menor cuando las comunidades arvenses tenían una mayor riqueza de especies. Por su parte, Adeux *et al.* (2019) realizaron un estudio en cultivos cerealistas de invierno en Francia, en el cual identificaron que el efecto de la vegetación arvense sobre la producción del cultivo era dependiente de la composición de estas comunidades. Comunidades arvenses más diversas funcionalmente y con una mayor equitatividad en la distribución de sus abundancias se asociaban con una menor pérdida de rendimiento del cultivo. En paralelo a estos estudios, diversos trabajos han señalado el papel de la microbiota del suelo en el funcionamiento de los agroecosistemas. Los microorganismos del suelo están implicados en los ciclos de diversos nutrientes, en la fijación de nitrógeno atmosférico, en la descomposición de compuestos orgánicos o en la producción de enzimas que estimulan el crecimiento de las plantas, aunque también incluyen organismos que pueden actuar como patógenos para la vegetación. Tanto en el caso de la vegetación arvense como en el de la microbiota edáfica, la composición y diversidad de sus comunidades es muy dependiente del tipo de manejo realizado.

La mayor parte de los estudios en torno al efecto de la diversidad arvense y de la microbiota edáfica sobre la producción del cultivo se han llevado a cabo en fincas experimentales y han considerado sólo uno de estos factores. En este trabajo analizamos el efecto de ambos, diversidad arvense y diversidad de la microbiota, sobre el rendimiento de cultivos de trigo (cantidad y calidad del grano). Además, trabajamos en campos de agricultores, convencionales y ecológicos, asegurando suficiente variabilidad en los manejos para obtener un gradiente en la diversidad de las comunidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022 se muestrearon un total de 26 campos cultivados con trigo (*Triticum aestivum* L. o *T. turgidum* subsp. *durum* Desf.). Los campos estaban situados en dos áreas cerealistas de la península ibérica (Andalucía y Cataluña) y fueron seleccionados en pares, de forma que cada par incluía un campo de manejo ecológico y uno de manejo convencional. Los pares de campos compartían unas condiciones ambientales similares en cuanto al tipo de suelo y las condiciones meteorológicas. En cada campo se ubicaron 14 marcos de 1m² poco después del establecimiento del cultivo y se mantuvieron hasta la cosecha del cereal. En cada campo, cuatro de estos marcos se mantuvieron sin vegetación arvense a lo largo del desarrollo del cultivo, utilizándose como control para establecer el rendimiento potencial de cada campo en ausencia de vegetación arvense.

Muestreo de la vegetación arvense.

Rendimiento y calidad del grano de trigo

La vegetación arvense se muestreó al final del estado de encañado del cultivo. En cada campo, en los diez marcos con vegetación arvense se registraron las especies presentes y se estimó visualmente la cobertura de cada una de ellas. Posteriormente se visitaron de nuevo los campos para obtener el rendimiento del cultivo (peso del grano), siguiendo la metodología de Hernández Plaza *et al.* (2022). Además de esta medida de rendimiento, se calculó el “rendimiento relativo”, correspondiente al cociente entre el peso del grano en cada marco con vegetación arvense y el promedio del peso del grano en los cuatro marcos desherbados del campo correspondiente. La calidad del grano de trigo se estimó, en cada marco, como el contenido en proteína. Para ello, se obtuvo el contenido en nitrógeno total (N) mediante el método Dumas y se multiplicó este valor por un factor de conversión (proteína = N × 5,83).

Muestreo de la microbiota edáfica

Para caracterizar las comunidades de hongos y bacterias del suelo, se tomaron muestras de suelo a 15 cm de profundidad en cada uno de los 14 marcos de cada campo, coincidiendo con el muestreo de la flora arvense. La secuenciación de las muestras se realizó en la Unidad de Genómica de la Fundación Parque Científico de Madrid (España) según protocolo estandarizado. Posteriormente, en el laboratorio de Fitopatología del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC) se procedió a la identificación de las variantes de secuencia de amplicones (ASVs) presentes en las muestras y a su clasificación taxonómica utilizando las bases de datos Silva SSU v.138 y UNITE v.8.3. para bacterias y hongos, respectivamente.

Cálculo de índices de diversidad y análisis estadísticos

En cada marco de muestreo, los datos de cobertura de especies arvenses y de abundancia de ASVs de hongos y bacterias sirvieron para calcular la diversidad taxonómica de las tres comunidades (arvenses, bacterias y hongos). La diversidad se calculó como el número efectivo de especies (e^H), es decir, el exponente del índice de diversidad de Shannon que equivale al número de Hill de orden uno.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el entorno de R (R Core Team, 2023). La relación entre el rendimiento, o el rendimiento relativo, del cultivo y la diversidad de especies arvenses, de hongos y de bacterias del suelo se analizó mediante modelos lineales mixtos. El e^H de hongos, bacterias y arvenses, así como la cobertura total de la vegetación arvense se incluyeron como factores fijos. Para modelar la influencia del tipo de manejo en estas relaciones, se incluyó, además, la variable “tipo de manejo” y su interacción con los otros factores. La variable “campo” se utilizó como factor aleatorio. Previamente al análisis se estandarizaron los datos. Las librerías *lme4* (Bates *et al.* 2015), *car* (Fox & Weisberg, 2019) e *interactions* (Long, 2019) se utilizaron para ajustar los modelos, obtener p-valores y para la representación gráfica de los efectos. Para analizar los efectos de la diversidad y del tipo de manejo sobre el contenido en proteína del grano se utilizó un modelo con una estructura similar,

pero en este caso también se incluyó la variable “biomasa de grano”. Utilizando también modelos lineales mixtos, se analizó el efecto del tipo de manejo (convencional u orgánico) sobre la abundancia y diversidad de la vegetación arvense y de la microbiota edáfica. Las asunciones de todos los modelos se comprobaron utilizando la librería *DHARMA* (Hartig, 2022). Se calculó en cada caso la variabilidad recogida por los factores fijos (R^2 marginal) y por el modelo completo (R^2 condicional).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los 26 campos muestreados registramos un total de 215 especies arvenses. Las principales especies detectadas fueron *Avena sterilis* L., *Centaurea diluta* Aiton, *Convolvulus arvensis* L., *Diploaxis eruroides* (L.) DC., *Glebionis coronaria* (L.) Cass. ex Spach, *Lolium rigidum* Gaudin, *Lysimachia arvensis* (L.) U. Manns & Anderb., *Papaver rhoeas* L. y *Stellaria media* (L.) Vill. La riqueza arvense, número de especies, en los marcos de muestreo (1m²) varió entre 0 y 16 con un valor medio de 6 especies. La riqueza de bacterias a nivel de género varió entre 36 y 2995 con una media de 1704. En los hongos estos valores oscilaron entre 6 y 410 con una media de 165 géneros en las muestras.

El tipo de manejo determinó la abundancia y la diversidad arvense. Los campos con manejo ecológico tuvieron una mayor cobertura (expresada en cm², coeficiente=2841; Chi-cuadrado=23,3; p<0,001) y diversidad (e^H , coeficiente=0,93; Chi-cuadrado=29,5; p<0,001) de especies arvenses. Este efecto ha sido señalado en diversos trabajos y puede explicarse por las prácticas de manejo. Éstas actúan como barreras o filtros a la dispersión y la supervivencia de las arvenses, determinando aquellas especies que persistirán en la comunidad en función de los atributos funcionales que posean. Las prácticas de manejo de la agricultura convencional, uso de herbicidas, mayores dosis de fertilizantes que en agricultura ecológica, limitan el establecimiento de las especies arvenses. La abundancia de ASVs de hongos y bacterias y la diversidad de géneros de bacterias no difirió entre campos ecológicos y convencionales, pero la diversidad de géneros de hongos fue mayor en los campos ecológicos (coeficiente=2; Chi-cuadrado=5,8; p=0,02).

Efecto sobre el rendimiento y la proteína del grano

Los factores que condicionaron el rendimiento a escala regional fueron: el tipo de manejo, la cobertura arvense y la diversidad de hongos (Tabla 1). En promedio, los rendimientos fueron mayores en los campos de manejo convencional que en los campos ecológicos. El rendimiento también disminuyó conforme aumentó la cobertura de la vegetación arvense y estuvo asociado a la diversidad de hongos del suelo. Estos efectos, sin embargo, estuvieron determinados por el tipo de manejo (interacción con "tipo de manejo"). Así, en aquellos casos con elevada cobertura de arvenses, los campos ecológicos registraron menores pérdidas de rendimiento que los campos de manejo convencional. Esto puede deberse a diferencias en la composición de las comunidades arvenses entre los dos tipos de manejo, que hayan causado una menor competencia en los campos ecológicos. Igualmente, una mayor diversidad de hongos se asoció con un mayor rendimiento en los campos ecológicos mientras que lo contrario sucedió en los campos de manejo convencional. Valores de diversidad fúngica similares pueden reflejar comunidades con composiciones y funcionalidades diferenciadas. Esto puede explicar el efecto contrastado, entre campos convencionales y ecológicos, de la diversidad de hongos sobre el rendimiento del cultivo.

Tabla 1 - Resumen de los efectos del modelo ajustado para la relación entre la diversidad de arvenses, de bacterias y de hongos del suelo y el rendimiento (peso del grano) de cultivos de trigo. e^H' se refiere al exponente del índice de Shannon. X denota interacción entre variables. En p-valor, *** indica $p < 0,001$, * $p < 0,05$ y ns indica un $p > 0,5$. $R^2 m = 0,14$ (efectos fijos) y $R^2 c = 0,60$ (modelo completo)

Variables	coeficiente	error estándar	p valor
intercepto	0,19	0,20	ns
manejo ecológico	-0,59	0,10	***
cobertura arvense	-0,28	0,12	*
e^H' arvense	0,02	0,07	ns
e^H' bacterias	-0,07	0,08	ns
e^H' hongos	-0,15	0,08	ns
manejo eco x cobertura arvense	0,29	0,14	*
manejo eco x e^H' arvense	0,13	0,11	ns
manejo eco x e^H' bacterias	0,01	0,09	ns
manejo eco x e^H' hongos	0,24	0,11	*

El rendimiento relativo, que indica los condicionantes a escala de parcela, estuvo explicado por la cobertura y la diversidad arvense. La pérdida de rendimiento fue mayor conforme aumentó la cobertura de la vegetación arvense (coeficiente = $-0,38 \pm 0,16$; Chi-cuadrado = 5,99; p-valor = 0,01), pero se redujo conforme los valores de diversidad arvense fueron mayores, y este efecto fue más pronunciado en los campos ecológicos (e^H' arvense X manejo ecológico; coeficiente = $0,31 \pm 0,14$; Chi-cuadrado = 4,40; p-valor = 0,04; Figura 1).

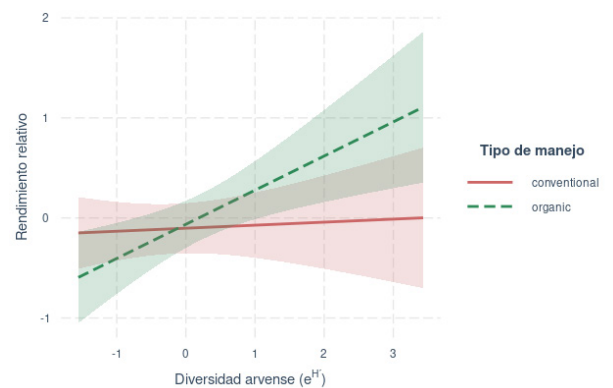


Figura 1 - Interacción entre la diversidad arvense (e^H') y el manejo (ecológico o convencional) para explicar la variabilidad encontrada en el rendimiento relativo de cultivos de trigo. Valores menores de 1 indican rendimientos inferiores en los marcos con arvenses frente a aquellos desherbados, mientras que valores superiores a 1 son indicativos de la situación contraria. $R^2 m = 0,10$ (efectos fijos) y $R^2 c = 0,19$ (modelo completo).

Finalmente, observamos una relación negativa entre el contenido en proteína y el peso del grano y este efecto fue más acusado en los campos ecológicos que en los convencionales (manejo ecológico X biomasa grano; coeficiente = $-0,006 \pm 0,001$; Chi-cuadrado = 18,2; p-valor < 0,001). La variabilidad explicada por los factores fijos del modelo fue reducida ($R^2 m = 0,17$) y sugiere la posibilidad de compatibilizar cantidad y calidad del grano. Sin embargo, es necesario identificar los factores que limitan la obtención de valores de proteína óptimos, especialmente en los campos ecológicos.

CONCLUSIONES

El tipo de manejo condiciona la abundancia y diversidad de las comunidades arvenses y estos factores, a su vez, tienen un efecto contrastado sobre el rendimiento de los cultivos. Caracterizar aquellas prácticas que permitan diversificar las comunidades arvenses puede ser una buena estrategia para reducir las pérdidas en el rendimiento asociadas a la presencia de estas especies. Por otra parte, los campos de manejo ecológico parecen mantener, mejor que los convencionales, los valores de rendimiento ante la presencia de vegetación arvense. Todo esto apunta a un funcionamiento distinto de los campos ecológicos y los convencionales. En parte, puede deberse a la microbiota asociada a cada tipo

de manejo. Sin embargo, para comprender mejor el efecto de ésta sobre el rendimiento, así como la interacción entre las especies arvenses y el cultivo, parece necesario considerar la composición de las comunidades y su estructura funcional, algo que pretendemos abordar en futuros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha llevado a cabo gracias a la colaboración de 26 agricultores y ha sido realizado en el marco del proyecto PID2019-103929RB-I00 financiado por MICIN/AEI/10.13039/501100011033 y los fondos “ERDF: A way of making Europe”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeux, G.; Vieren, E.; Carlesi, S.; Barberi, P.; Munier-Jolain, N. & Cordeau, S. (2019) - Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability*, vol. 2, p. 1018–1026. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0415-y>
- Bates, D.; Maechler, M.; Bolker, B. & Walker, S. (2015) - Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, vol. 67, n. 1, p. 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Fox, J. & Weisberg, S. (2019) - *An R Companion to Applied Regression*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Hartig, F. (2022) - DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.6. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>
- Hernández Plaza, E.; Bastida, F.; Gibson, D.J.; Barro, F.; Pallavicini, Y.; Izquierdo, J. & González-Andújar, J.L. (2022) - Grain Quality as Influenced by the Structural Properties of Weed Communities in Mediterranean Wheat Crops. *Agronomy*, vol. 13, n. 1, art. 49. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010049>
- Long, J.A. (2019) - *Interactions: Comprehensive, User-Friendly Toolkit for Probing Interactions*_. R package version 1.1.0. <https://cran.r-project.org/package=interactions>
- MacLaren, C.; Storkey, J.; Menegat, A.; Metcalfe, H. & Dehnen-Schmutz, K. (2020) - An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 40, art. 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6>
- R Core Team (2023) - *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Version 4.3.2 em Linux
- Storkey, J. & Neve, P. (2018) - What good is weed diversity? *Weed Research*, vol. 58, n. 4, p. 239-243. <https://doi.org/10.1111/wre.12310>