



Eficiencia de uso del agua en diferentes secuencias de cultivos y barbechos en Argentina¹

Efficiency of water use in different sequences of crops and fallows in Argentina

Silvina Golik², Adriana M. Chamorro², Rodolfo Bezus², Andrea Pellegrini², Axel Voisin³

- ¹ Recepción: 26 de noviembre, 2021. Aceptación: 20 de abril, 2022. El presente trabajo fue resultado de los proyectos de incentivos A288 y A 348 de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- ² Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. silvinaGolik@yahoo.com.ar (autora para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-4876-1154>), chamorro@agro.unlp.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-5475-5754>), bezus@agro.unlp.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-2946-1690>), aepellegrini@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1291-5676>).
- ³ Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. axelvoisin@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1025-9828>).

Resumen

Introducción. El agua es el factor más limitante en la producción de cultivos extensivos en secano en la región pampeana de Argentina y de muchos lugares del mundo. **Objetivo.** Determinar la eficiencia de uso del agua, tanto en rendimiento en grano como en biomasa total producida, para diferentes secuencias de cultivos bajo distintos manejos de sus barbechos. **Materiales y métodos.** El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, J. Hirschhorn (34° 52' LS, 57° 58' LO), La Plata, Buenos Aires, Argentina, donde desde el año 2011 se trabaja con cuatro secuencias de cultivos y a partir del año 2015, en el período entre los cultivos de verano, se implementaron diferentes tratamientos que incluyeron el uso de cultivos de cobertura con y sin fertilización en el cultivo sucesor y la aplicación de compost. Durante el período 2015 - 2018 se determinó la biomasa total producida, el rendimiento y la eficiencia de uso del agua. **Resultados.** La secuencia avena (*Avena sativa* L.) / soja (*Glycine max* L.) 2da - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), resultó las más eficiente en el uso del agua. En último lugar, se encontró la secuencia trigo / soja 2da - soja - soja - trigo, con mayor frecuencia del cultivo soja. Los distintos tipos de barbechos afectaron la eficiencia de uso del agua, con valores menos eficientes bajo el tratamiento testigo. **Conclusión.** Las secuencias de cultivos analizadas presentaron diferencias en el uso del agua. Los barbechos con cultivos de cobertura y compost resultaron más eficientes en el uso del agua para grano en un 10,85 %, y para biomasa en un 3,64 % en promedio.

Palabras claves: compost, cultivos de cobertura, gramíneas, oleaginosas, sustentabilidad.

Abstract

Introduction. Water is the most limiting factor in the production of extensive rainfed crops in the Pampas region of Argentina and in many parts of the world. **Objective.** To determine the water use efficiency, both in grain yield and in total biomass produced, for different crop sequences under different fallow managements. **Materials and**



methods. The trial was carried out in the Experimental Station of the Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, J. Hirschhorn (34 ° 52' LS, 57 ° 58' LO), La Plata, Buenos Aires, Argentina, where since 2011 four crop sequences have been working and from 2015, in the period between summer crops, different treatments were implemented that included the use of cover crops with and without fertilization in the successor crop and the application of compost. During the period 2015 - 2018, total biomass produced, yield, and water use efficiency were determined. **Results.** The sequence oats (*Avena sativa* L.) / soybean (*Glicine max* L.) 2nd - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.) was the most efficient in the use of water. In the last place, the sequence wheat / soybean 2nd-soybean-soybean-wheat was found, with the highest frequency of the soybean crop. The different types of fallows affected the water use efficiency, with less efficient values under the control treatment. **Conclusion.** The crop sequences analyzed showed differences in water use. The fallows with cover crops and compost were more efficient in water use by 10,85 % on average of grain, and in 3,64 % on average of biomass.

Keywords: compost, cover crops, grasses, oilseeds, sustainability.

Introducción

El agua es el factor más limitante en la producción de cultivos extensivos en secano en la región Pampeana de Argentina y en muchas otras regiones del mundo. En la mayoría de los casos este problema no es debido a la falta de precipitaciones, sino a problemas en la captación, almacenaje y/o pérdidas por escurrimiento y evaporación. Resulta imprescindible producir con un uso eficiente de este escaso recurso (Micucci & Álvarez, 2004; Sadras & McDonald, 2012). El rendimiento en granos de los cultivos depende de la cantidad de agua que puedan transpirar, la eficiencia con que se usa para producir biomasa y su proporción destinada a la formación de los granos (Sadras & McDonald, 2012). La cantidad máxima de agua disponible para el cultivo que un suelo puede almacenar, se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, y estos límites varían con el tipo de suelo. A su vez, la absorción de agua que puede realizar el cultivo depende de diversos factores, entre ellos la cantidad de agua disponible (Rattalino Edreira et al., 2018), la densidad y la profundidad de las raíces, la conductividad hidráulica de los tejidos vasculares, la capacidad de ajuste osmótico y el tipo de cultivo (Hatfield & Dold, 2019).

En general, los cultivos de verano están expuestos a sequías de intensidad y duración variables, que se originan por una combinación de factores ambientales como las lluvias y altas temperaturas. En muchos cultivos de invierno se ve afectada la implantación y sus primeros estadios, debido a la distribución de las lluvias en la primavera-verano-otoño, en gran parte de la región productiva de Argentina.

Las mayores disminuciones en rendimiento se producen cuando el déficit hídrico ocurre alrededor de floración del trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.) o girasol (*Helianthus annuus* L.), es decir durante el periodo crítico de determinación del número de granos (Sadras & McDonald, 2012). En cambio, la soja (*Glicine max* L.) se ve más afectada por sequías tardías, en las etapas reproductivas avanzadas, debido a su hábito de crecimiento indeterminado (Andrade & Sadras, 2000). Si bien la máxima cantidad de agua almacenada por un suelo depende de su textura y estructura, esta capacidad de almacenaje puede mejorarse a través de distintas prácticas de manejo del suelo como la siembra directa, la rotación de cultivos y distintas alternativas de barbecho y manejo de los rastrojos (Hatfield & Dold, 2019; Tomaz et al., 2018; van Duinen et al., 2015). Entre estas últimas, se ha informado que la incorporación de cultivos de cobertura (CC) o de servicio (cultivos sembrados con el objeto de mejorar aspectos del suelo o los cultivos que se realizan en la rotación con fines productivos), de crecimiento otoño-invernal, entre cultivos estivales de una secuencia, mejoran la eficiencia del uso de los recursos: agua, nutrientes y radiación.

Los cultivos de cobertura poseen un efecto protector sobre el suelo, ya que disminuyen la ruptura de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia y generan en sus raíces un entramado que consolida la estructura porosa del suelo (Alvarez et al., 2009). También mejoran la captación de agua y reducen encharcamientos, los riesgos de salinización por ascenso capilar, la evaporación e incrementan la eficiencia de conservación y disponibilidad de agua en el suelo (Cazorla et al., 2018; de Sá Pereira et al., 2017). Diferentes parámetros de calidad de la biomasa de distintos CC (relación C:N y lignina:N) y cómo los mismos influyen en la disponibilidad de N y C en el suelo para el cultivo sucesor, fueron evaluados por de Sá Pereyra et al. (2017). A mayor concentración de N en la biomasa aérea del CC, mayor fue el aporte de N al suelo, debido a una mineralización más rápida. No obstante, esta disponibilidad al quedar los rastrojos en la superficie resulta más lenta que la efectuada por un compost. Esto podría ser considerado como una desventaja desde el punto de vista de la nutrición del cultivo sucesor, pero es una ventaja según Rimski-Korsakov et al. (2004) si se tiene en cuenta la probabilidad de su lixiviación por lluvias o su pérdida vía evaporación o consumo por malezas.

Otra alternativa de barbecho resulta en la aplicación de residuos orgánicos compostados. La adición de materia orgánica compostada al suelo durante ese período, en forma de estiércoles u otros residuos orgánicos, generados en las propias explotaciones agrícolas y ganaderas o en zonas urbanas, con el objetivo de mejorar su fertilidad y restituir los elementos nutritivos extraídos por los cultivos, surge como una alternativa promisoría en los cultivos extensivos (Sarwar et al., 2007). El compost de cama de pollo (sustrato sobre el cual las aves depositan sus deyecciones), se caracteriza por aumentar el contenido de P y N (De Battista & Arias, 2016). Los beneficios de utilizar compost como alternativa de fertilizantes de síntesis química, también fueron demostrado por Lauric et al. (2010) al evaluar el efecto de una fertilización orgánica con guano de pollo (1,86 % P total) sobre el rendimiento del cultivo de trigo.

El tipo y duración del barbecho resulta fundamental para la acumulación de agua, puesto que permite cierta autonomía cuando las lluvias no alcanzan a cubrir la demanda del cultivo. En este aspecto, es primordial la primera porción del perfil del suelo, que representa en muchos casos más del 50 % del total de agua disponible.

La eficiencia de uso del agua (EUA) de un cultivo puede ser definida en distintas escalas. De manera general, en condiciones de secano, se la define como el rendimiento o producción de biomasa por unidad de agua consumida. El agua consumida puede expresarse como transpiración, evapotranspiración o precipitación (Rattalino Edreira et al., 2018; Micucci & Álvarez, 2004; Sadras & McDonald, 2012; Vasco Silva et al., 2020). La EUA varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo C3 o C4, composición de la biomasa y a las características del uso del agua (Rattalino Edreira et al., 2018; Sadras & McDonald, 2012). De ahí la importancia, entre muchas otras razones, de las rotaciones de cultivos versus el monocultivo sojero, de amplia difusión en Argentina. A través del manejo, se puede manipular el sistema agrícola para evitar pérdidas de agua no productivas como escurrimiento, evaporación desde el suelo y consumo por malezas.

Se atribuye un aumento de la EUA a la fertilización nitrogenada relacionado con un incremento en el uso de la radiación por una mayor concentración de N en las plantas, lo que aumenta la capacidad fotosintética (Caviglia & Sadras, 2001; Sadras & McDonald, 2012). El P incrementa la EUA y la tolerancia de los cultivos a la sequía, a través del desarrollo temprano del cultivo, reduce la evaporación del agua del suelo, lo que favorece la transpiración del cultivo, por la mayor proliferación y actividad de las raíces (Divito et al., 2017).

Desde el año 2011, en la Estación Experimental J. Hirschhorn dependiente de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina, se conducen ensayos en campo en los que se comparan distintas secuencias agrícolas, con la finalidad de evaluar cómo minimizar los impactos ambientales asociados a la alta frecuencia de soja o su monocultivo en los sistemas agrícolas. Las rotaciones de cultivos, junto con otras prácticas de manejo como la siembra directa, la fertilización y el manejo eficiente de los barbechos, son pilares fundamentales a la hora de considerar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas continuos (Ferrari, 2010; Voisin et al., 2022). Estas prácticas agronómicas, a su vez afectan el consumo y la EUA (van Duinen et al., 2015; Hatfield & Dold, 2019; Micucci & Álvarez, 2004; Tomaz et al., 2018).

El objetivo de este trabajo fue determinar la eficiencia de uso del agua, tanto en rendimiento en grano como en biomasa total producida, para diferentes secuencias de cultivos bajo distintos manejos de sus barbechos.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental Julio Hirschhorn (34° 52' LS, 57° 58' LO), localizada en Los Hornos, partido de La Plata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), sobre un suelo Argiudol típico. En el ensayo de campo, que se inició en el año 2011, se compararon distintas secuencias agrícolas (S) que se repitieron cada cuatro años. Las secuencias fueron: S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja de segunda (2da) (*Glicine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.); S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo; S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da -maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo; y S4: trigo / soja 2da - soja – soja - trigo. Se consideró soja de 2da a la implantada luego de cosechado el cultivo anterior, sin mediar un barbecho entre ellos.

A partir del período 2015 - 16, se manejaron con cuatro alternativas de barbechos entre la implantación de los cultivos de verano, si bien en todos se hizo un control químico de las malezas, se implementaron distintos manejos en relación con la nutrición de los cultivos: 1) barbecho químico o tradicional con aplicación de una dosis media de fertilizantes (testigo); 2) aplicación de compost: el mismo se obtuvo a partir cama de pollo, que fue tomada de un galpón dedicado a la producción de pollos reproductores, la gallinaza se sometió a un proceso de compostaje por seis meses y cuyo análisis presentó los siguientes resultados: humedad: 52 %, materia orgánica: 50 %, carbono orgánico: 27,8 %, nitrógeno total: 2,5 %, fósforo total: 1,3 %; relación carbono nitrógeno: 11, pH: 8,5, conductividad eléctrica: 16,2 dS m⁻¹ (compost); 3) inclusión de cultivo de cobertura, sin agregado de fertilizantes al cultivo sucesor (CCM); y 4) inclusión de cultivo de cobertura más la aplicación de dosis altas de fertilizantes que aportasen nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), tendientes a reponer las extracciones de los cultivos (CCA). Las dosis empleadas en el CCA fueron de: 80 kg ha⁻¹ fosfato di amónico + 180 kg ha⁻¹ de urea en los cereales de invierno y la colza; 160 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio + 11 kg ha⁻¹ sulfato de amonio + 160 kg ha⁻¹ de urea en el maíz; 75 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio en la soja; 25 kg ha⁻¹ de fosfato di amónico + 56,6 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio en el girasol y 56,6 kg ha⁻¹ de fosfato di amónico + 119 kg ha⁻¹ de urea + 56,6 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio en el sorgo. La fertilización en el tratamiento testigo consistió en: la aplicación de 50 kg ha⁻¹ fosfato di amónico + 100 kg ha⁻¹ de urea en los cereales de invierno y la colza y de 80 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio + 100 kg ha⁻¹ de urea en el maíz.

Con base en datos de Sarwar et al. (2007), según tipo de suelo en cultivos extensivos y tipo de compost, se utilizó 20 t ha⁻¹, lo que implicó 2 kg m⁻². El cultivo de cobertura (CC) consistió en una mezcla de avena y vicia (*Vicia sativa* L.) a una densidad de 50 kg ha⁻¹ de la gramínea y 20 kg ha⁻¹ de la leguminosa.

El período analizado en este trabajo abarcó el segundo ciclo de las mencionadas secuencias, desde el año 2015 al 2018 inclusive, en el que se incluyeron dos veces (entre los cultivos de verano) los distintos tipos de barbechos antes citados (Cuadro 1). La siembra de los cultivos se realizó sin remoción del suelo. Para todos los cultivos se determinó la biomasa total producida y el rendimiento (Cuadro 1). Los cultivos de cobertura se sembraron el 9 de junio en el 2016 y el 2 de junio en el 2017. Su secado se realizó el 9 de octubre en el 2016, con 200 cc ha⁻¹ de dicamba + 4 L ha⁻¹ de glifosato (48 %), y el 7 de octubre en el 2017, con 3 L ha⁻¹ de glifosato (48 %). El compost se aplicó el 17 de julio en el 2016 y el 27 de julio en el 2017.

La eficiencia de uso del agua (EUA) se calculó según la siguiente fórmula: $EUA [kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}] = R / Pp$, donde R se refiere al rendimiento en grano o biomasa total y Pp son las precipitaciones. Para esto se consideró la suma de las lluvias promedio mensuales ocurridas durante el ciclo de cada uno de los cultivos y los dos meses previos a su siembra, excepto en la soja de segunda, en la cual, al no tener barbecho, solo se contabilizaron las precipitaciones durante el ciclo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Secuencias de cultivos, con los valores de lluvias registradas durante sus ciclos, y distintos barbechos para el período analizado: 2015-2018. Estación Experimental Julio Hirschhorn, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Table 1. Crop sequences, with the rainfall values recorded during their cycles, and different fallows for the analyzed period: 2015-2018. Julio Hirschhorn Experimental Station, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Secuencia	Secuencia 1	Secuencia 2	Secuencia 3	Secuencia 4
Año 2015				
Cultivo	Avena (<i>Avena sativa</i> L.)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Colza (<i>Brassica napus</i> L.)	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)
Día de siembra	17/07/2015	17/07/2015	16/07/2015	17/07/2015
Día de cosecha	21/12/2015	18/12/2015	19/11/2015	21/12/2015
Lluvias durante el ciclo del cultivo mm	539,5	525,3	554,7	539,5
Biomasa media kg ha ⁻¹	31956	32980	7133	22902
Rendimiento medio kg ha ⁻¹	9624	6159	1378	9855
Año 2016				
Cultivo	Soja 2da*	Soja 2da*	Soja 2da*	Soja 2da*
Día de siembra	15/01/2016	15/01/2016	15/01/2016	15/01/2016
Día de cosecha	12/05/2016	12/05/2016	12/05/2016	12/05/2016
Lluvias durante el ciclo del cultivo mm	418,8	418,8	418,8	418,8
Biomasa media kg ha ⁻¹	3355	3631	2222	3434
Rendimiento medio kg ha ⁻¹	1333	1516	857	1390
Barbechos: testigo, compost, CCM** y CCA***				
Cultivo	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Soja (<i>Glycine max</i> L.)
Día de siembra	25/11/2016	25/11/2016	25/11/2016	04/11/2016
Día de cosecha	07/04/2017	07/04/2017	07/04/2017	31/03/2017
Lluvias durante el ciclo del cultivo mm	552,1	552,1	552,1	552,1
Biomasa media kg ha ⁻¹	32119	32893	33486	12028
Rendimiento medio kg ha ⁻¹	10593	11153	11768	5003
Año 2017				
Barbechos: testigo, compost, CCM** y CCA***				
Cultivo	Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Soja	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	Soja
Día de siembra	18/10/2017	17/11/2017	14/12/2017	17/11/2017
Día de cosecha	13/03/2018	13/04/2018	06/04/2018	13/04/2018
Lluvias durante el ciclo del cultivo mm	319,2	531,8	412,4	531,8
Biomasa media kg ha ⁻¹	12254	8687	19157	7635
Rendimiento medio kg ha ⁻¹	3729	3350	6451	2911
Año 2018				
Cultivo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
Día de siembra	10/07/2018	10/07/2018	10/07/2018	10/07/2018
Día de cosecha	19/12/2018	19/12/2018	19/12/2018	19/12/2018
Lluvias durante el ciclo del cultivo mm	678,4	678,4	678,4	678,4
Biomasa media kg ha ⁻¹	16278	16037	14676	14862
Rendimiento medio kg ha ⁻¹	7569	7212	6883	6804

*Soja sembrada luego de la cosecha del cultivo antecesor, sin mediar barbecho. / *Soybeans sown after from the harvest of the predecessor crop, without fallow.

Cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor. / **Cover crop without fertilization in the successor crop. *Cultivo de cobertura con fertilización en el cultivo sucesor. / ***Cover crop with fertilization in the successor crop.

Se analizaron las condiciones climáticas respecto a lluvias y temperaturas desde el año 2015 al 2018 inclusive, y los registros históricos entre el año 1964 y 2014, obtenidos por una estación automática, modelo Davis Advantage Pro2, ubicada: latitud 34° 59" S - longitud 57° 59" W de G - 45 m de altitud, de la estación meteorológica de la Estación Experimental J. Hirschhorn.

Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con cuatro repeticiones y parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a las secuencias y la subparcela al tipo de barbecho. Los datos obtenidos de EUA se procesaron por el análisis de la varianza con la prueba de Tukey para la comparación de medias ($p < 0,05$). Se comprobaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y distribución normal de los errores. Se utilizó el software estadístico InfoStat versión 2016 (Di Rienzo et al., 2016).

Resultados

Las lluvias totales durante los años 2016, 2017 y 2018 fueron similares a las históricas en cantidad (estas últimas presentaron una distribución primavera-verano-otoño), con un media anual de 1012 mm. El año 2015 fue la excepción con 884,9 mm, con una distribución muy irregular, puesto que fueron muy elevadas en enero, muy bajas desde marzo a julio, en agosto tuvieron un significativo incremento, que disminuyó durante septiembre y octubre y volvió a presentar un pico en noviembre y una caída en diciembre. El año 2016 también presentó una distribución irregular, con máximas precipitaciones desde abril a julio y en diciembre. El año 2017 fue el año que presentó una distribución más semejante a las históricas y en el año 2018 hubo una disminución de precipitaciones marcadas durante febrero y junio y dos picos por encima de las precipitaciones históricas en mayo y diciembre (Figura 1).

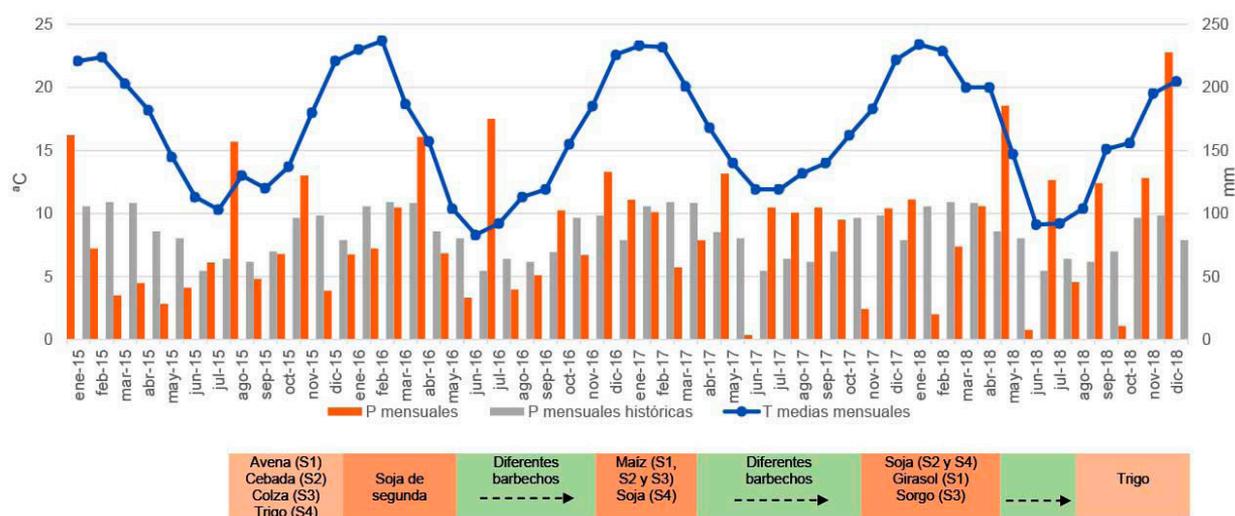


Figura 1. Datos climáticos período 2015-2018 e históricos (1964-2014). Estación Experimental Julio Hirschhorn, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Figure 1. Climatic data for the 2015-2018 period and historical (1964-2014). Julio Hirschhorn Experimental Station, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

No se encontraron diferencias significativas para la interacción Barbecho \times Secuencia para la EUA en la producción de granos y de biomasa total. Sí se hallaron diferencias significativas para las distintas secuencias ($p < 0,001$) y para los distintos barbechos ($p < 0,001$).

La secuencia con mejor EUA en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de granos fue la S1 y la peor la S4, con valores intermedios y semejantes entre sí para las secuencias S2 y S3 (Figura 2a). Al analizar los cultivos componentes de cada secuencia se observó que los cultivos más eficientes en la EUA resultaron ser las gramíneas invernales: avena, cebada, trigo y

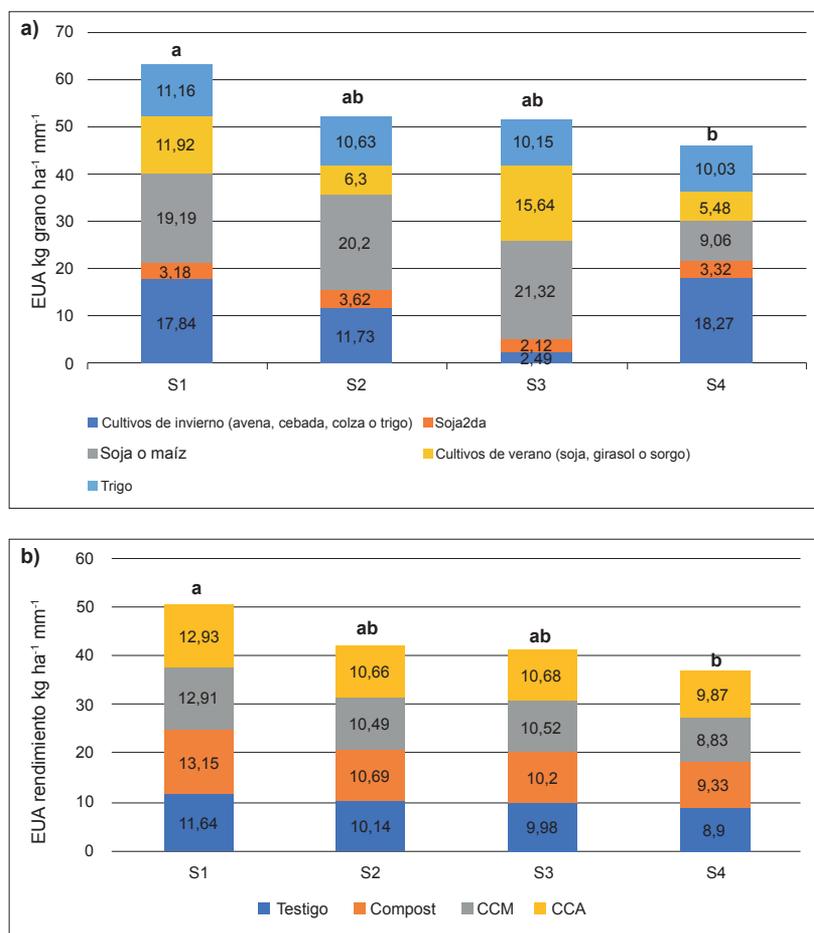


Figura 2. a) Eficiencia de uso del agua (EUA) para la producción de grano total ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de grano) para cuatro secuencias de cultivos (S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja 2da (*Glycine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo; b) EUA para la producción de grano total ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de grano) para cuatro manejos del barbecho [testigo, compost, CCM (cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor) y CCA (cultivo de cobertura con fertilización en el cultivo sucesor)]. Estación Experimental Julio Hirschhorn, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Período 2015-2018.

Para las columnas letras distintas implican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Figure 2. a) WUE for total grain production ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ of grain) for four crop sequences (S1: oats (*Avena sativa* L.) / soybean 2nd (*Glycine max* L.) - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.), S2: barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean 2nd - corn - soybean - wheat, S3: rapeseed (*Brassica napus* L.) / soybean 2nd - corn - sorghum (*Sorghum bicolor* L.) - wheat, and S4: wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat); b) WUE for total grain production ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de of grain) for four fallow management [(control, compost, CCM (cover crop without fertilization in the successor crop), and CCA (cover crop with fertilization in the successor crop)]. Julio Hirschhorn Experimental Station, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Period 2015-2018.

For columns different letters imply significant differences ($p < 0,05$).

las estivales: maíz y sorgo. Los cultivos oleaginosos fueron los menos eficientes en el uso del agua (colza, girasol y soja) (Figura 2a).

Respecto a las alternativas de barbechos, el testigo, con el barbecho químico tradicional resultó el de menores valores de EUA en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de granos, en todas las secuencias (Figura 2b). En orden creciente de eficiencia le siguieron CCM, CCA y/o compost. A su vez la S1 siempre presentó los valores más altos de EUA para todos los manejos de barbechos y la S4 los valores más bajos (Figura 2b).

Las mismas tendencias que las halladas para la EUA en $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de granos, se encontraron para la EUA de la biomasa total (Figuras 3a y 3b). En estos casos las diferencias en la EUA, entre las gramíneas y los otros cultivos fueron de mayor magnitud, y entre las alternativas de barbechos de menor magnitud.

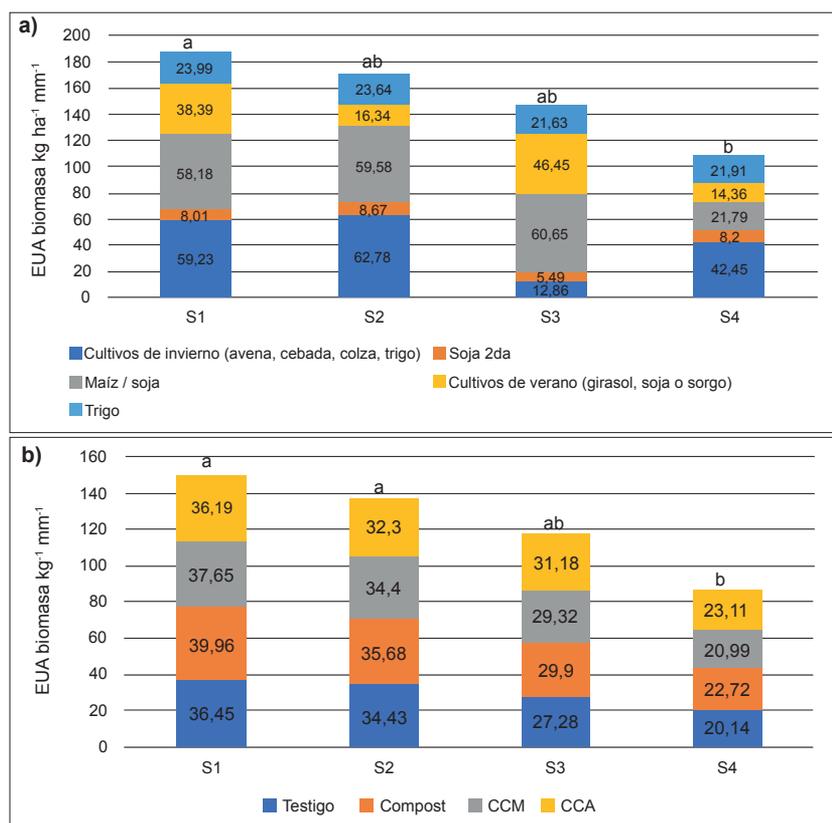


Figura 3. a) Eficiencia de uso del agua (EUA) para la producción de biomasa total ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ de biomasa) para cuatro secuencias de cultivos (S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja 2da (*Glycine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo); b) EUA para la producción de biomasa total ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ biomasa) para cuatro manejos del barbecho (testigo, compost, CCM (cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor) y CCA (cultivo de cobertura con fertilización en el cultivo sucesor)). Estación Experimental Julio Hirschhorn, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Período 2015-2018.

Para las columnas letras distintas implican diferencias significativas ($P < 0,05$).

Figura 3. a) WUE for total biomass production ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ of biomass) for four crop sequences (S1: oats (*Avena sativa* L.) / soybean 2nd (*Glycine max* L.) - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.), S2: barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean 2nd - corn - soybean - wheat, S3: rapeseed (*Brassica napus* L.) / soybean 2nd - corn - sorghum (*Sorghum bicolor* L.) - wheat, and S4: wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat); b) WUE for total biomass production ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ biomass) for four fallow operations (control, compost, CCM (cover crop without fertilization in the successor crop) and CCA (cover crop with fertilization in the successor crop)). Estación Experimental Julio Hirschhorn, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Período 2015-2018.

For columns different letters imply significant differences ($P < 0.05$).

Con base en la biomasa total, la EUA promedio para los cereales de invierno fue de 54,82 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa, un 76,60 % superior a la del cultivo de colza (12,86 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa).

En la segunda campaña los maíces de las secuencias S1, S2 y S3, presentaron en promedio una EUA de 20,23 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano, un 44,63 % superior respecto a la soja de primera de la secuencia S4, que fue de 9,03 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano. Con base en la biomasa total la EUA para los maíces de las secuencias S1, S2 y S3 fue de 59,47 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa, un 63,66 % superior a la del cultivo de soja de la S4 (21,79 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa).

En la tercera campaña, debido a su metabolismo C4 y al bajo contenido energético de la biomasa reproductiva, el sorgo fue más eficiente (15,64 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano y 46,45 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa) que el girasol de la S1 (11,92 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano y 38,39 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa) y que la soja de las secuencias S2 y S4 (5,89 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano y 15,35 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa, promedio para ambas secuencias), y capturó más CO₂ por unidad de agua transpirada. El girasol, en cambio, al tener un producto con alta concentración de aceite en el grano, posee menor tasa de crecimiento por unidad de agua. La soja presenta una baja eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético en sus granos.

En la cuarta campaña todas las secuencias poseían trigo, y mostraron en promedio una EUA de 10,56 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano y de 22,79 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de biomasa.

Discusión

Las variaciones en la distribución de las precipitaciones para los años analizados no resultaron limitantes para el desarrollo de los cultivos. Las temperaturas en general fueron similares a las históricas, a excepción del año 2016, que presentó temperaturas más frescas desde marzo hasta fines de junio. Estas variaciones en la distribución de las precipitaciones para distintas regiones del mundo son cada vez más frecuentes, están asociadas a los actuales cambios climáticos (Hatfield & Dold, 2019). Se ha establecido que la eficiencia de uso del agua (EUA) está relacionada con la precipitación anual, la productividad primaria bruta y la duración de la etapa de crecimiento de los diferentes cultivos (Xiao et al., 2013). En este trabajo, las secuencias: S1: avena / soja 2da - maíz - girasol - trigo y luego S2: cebada / soja 2da - maíz - soja - trigo, y S3: colza / soja 2da - maíz - sorgo - trigo, resultaron más eficientes en el uso del agua, asociado a las gramíneas presentes. En último lugar, se encontró la S4, secuencia con mayor frecuencia del cultivo soja.

La EUA fue más alta para los cereales que para los cultivos oleaginosos y los proteicos. Esto se pudo deber, en gran parte, al costo energético de producir proteína, aceite o almidón, aunque también a la mayor eficiencia fotosintética de las gramíneas C4 como el maíz y el sorgo y a su estructura foliar, que permite una distribución más pareja de la radiación en el canopeo (Andrade & Sadras, 2000; Hatfield & Dold, 2019; Taylor et al., 2010). Coincidieron con ello, para la primera campaña, los cereales de invierno (avena, cebada y trigo) que presentaron para el rendimiento una EUA promedio de 15,94 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano, un 84,37 % superior a la del cultivo de colza (2,49 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grano). En diferentes cultivos en Holanda, se hallaron valores similares a los obtenidos en este trabajo, para la cebada de primavera (13 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de granos) y para el trigo de invierno (15 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de granos) (Vasco Silva et al., 2020).

Con base en la biomasa, los resultados de EUA concuerdan con los hallados por Bertolla et al. (2012), con menores valores de EUA en los cultivos oleaginosos y proteicos (colza, girasol, soja) en relación con las gramíneas (avena, cebada, trigo, sorgo y maíz), debido a los mayores requerimientos térmicos, por lo tanto, menor producción de biomasa.

Ha sido señalado que el efecto combinado de diferentes prácticas agronómicas, entre otras, las rotaciones, el sistema de labranza, tratamiento de los residuos, tipos y duración de barbechos y la fertilización, mejoran la EUA (Hatfield & Dold, 2019).

La siembra directa conserva un alto porcentaje de residuos en superficie, que incrementan la EUA respecto de la labranza convencional (Bono & Romano, 2007; Dardanelli et al., 2003; Hatfield & Dold, 2019).

El agua acumulada durante el período de barbecho afecta el crecimiento en los primeros estadios de los cultivos, y puede asegurar en muchos casos la disponibilidad de agua en el período crítico de los mismos. Con maíz y trigo en distintas regiones del mundo se encontró una amplia variabilidad en los valores de EUA y estos muchas veces se hallaban más condicionados por otros factores no relacionados con el agua (deficiencias de manejo, estrés biótico y abiótico) (Rattalino Edreira et al., 2018). Así, por ejemplo, para el maíz la EUA se hallaba por debajo de $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano en el sur de Asia y el área sub-Sahara de África y, por el contrario, en Europa occidental y América del Norte exhibieron una EUA o productividad más alta ($26 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano). De manera similar, en el área sub-Sahara de África y Este medio y el norte de África exhibieron una productividad actual baja para el trigo (5 y $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano), mientras que Europa occidental mostró una EUA más alta ($17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano). Incluso en entornos muy duros para la producción de cultivos de secano, como Oceanía, el Este medio y el norte de África, los factores no relacionados con el agua eran tan limitantes como el suministro de agua.

A su vez, en Holanda, se ha concluido que, si bien la cantidad total de agua disponible resulta suficiente para evitar grandes limitaciones de agua para la mayoría de los cultivos, muchas veces existe variabilidad en la distribución y disponibilidad de las lluvias en períodos claves del crecimiento y se requieren medidas de adaptación a nivel de campo, granja y región (van Duinen et al., 2015). Se ha indicado que, en el corto plazo, la mejor manera de incrementar la eficiencia de uso del agua es reducir la brecha de rendimiento mediante la adopción de prácticas de agricultura de precisión y la provisión de riego complementario para evitar limitaciones de agua en períodos claves del ciclo de los cultivos (Vasco Silva et al., 2017). A largo plazo, es importante diseñar estrategias para gestionar y utilizar el excedente de agua actual de manera eficiente. Estas incluyen mejorar los sistemas de drenaje actuales en suelos arcillosos y la capacidad para almacenar agua y la eficiencia de los sistemas de riego actuales, en suelos arenosos (van Duinen et al., 2015).

Se puede mejorar la EUA, mediante la adopción de prácticas que permitan reducir el componente de evaporación del agua del suelo y desviar más agua hacia la transpiración, lo cual puede hacerse a través de la gestión de los residuos de los cultivos, el espaciado entre hileras y el riego (Hatfield & Dold, 2019). Una adecuada fertilización mejora la EUA, puesto que favorece el crecimiento de un buen canopeo que reduce la evaporación del agua del suelo, lo cual incrementa la disponibilidad de agua para las plantas. Los efectos positivos de los barbechos alternativos con cultivos de cobertura y/o compost resultaron evidentes en el presente trabajo, con valores más eficientes en la EUA comparados con el tratamiento testigo.

La EUA bajo los tratamientos con CCA, compost y CCM resultaron, en promedio para las cuatro secuencias, superiores respecto al tratamiento con barbecho químico en un 11,03 %, 10,84 %, 10,69 % en $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano y en un 5,95 %, 3,34 % y 1,63 % en $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de biomasa, respectivamente.

Conclusiones

Las secuencias analizadas presentaron diferencias en el uso del agua, asociadas a sus cultivos componentes. Resultó mayor para los cereales en comparación con los cultivos oleaginosos y proteicos.

Los barbechos con cultivo de cobertura y compost resultaron los más eficientes en el uso del agua. La EUA bajo los tratamientos con cultivo de cobertura con fertilización, compost y cultivo de cobertura sin fertilización resultaron, en promedio para las cuatro secuencias, superiores en un 11,03 %, 10,69 %, 10,84 % de grano y en un 5,95 %, 3,34 % y 1,63 % de biomasa, respectivamente, respecto al tratamiento testigo, con barbecho químico.

Los tratamientos con compost y cultivo de cobertura, además de permitir una mayor cobertura del suelo y lograr una menor evaporación del agua, realizaron un aporte de nutrientes, vía residuos orgánicos compostados en los primeros y a través de la fijación biológica del N en los segundos, lo que resulta prometedor en la realización

de una agricultura sustentable, que preserve y mejore el recurso suelo a través de un reemplazo total y/o parcial de los fertilizantes de síntesis química.

Los cambios climáticos afectan el crecimiento de las plantas, pero hay herramientas para mejorar la EUA a través de la selección de cultivos y prácticas culturales para compensar el impacto del clima.

Referencias

- Alvarez, C. R., Taboada, M. A., Gutierrez Boem, F. H., Bono, A., Fernandez, P. L., & Prystupa, P. (2009). Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4), 1242–1250. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0246>
- Andrade, F. H., & Sadras, V. O. (2000). Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En F. H. Andrade, & V. O. Sadras (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 173–206). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Bertolla, A., Baigorria, T., Gómez, D., Cazorla, C., Cagliero, M., Lardone, A., Bojanich, M., & Aimetta, B. (2012). Efecto de la fertilización sobre la eficiencia del uso del agua de especies invernales utilizadas como cultivos de cobertura. En C. Álvarez, A. Quiroga, S. Diego, & M. Bodrero (Eds.), *Contribución de los cultivos de cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de producción* (1ª ed. pp. 138–147). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Bono, A., & Romano, N. (2007). Métodos de diagnóstico de fertilización. En A. Quiroga, & A. Bono. (Eds.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (pp. 72–83). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Caviglia, O. P., & Sadras, V. O. (2001). Effect of nitrogen supply on crop conductance, water, and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Research*, 69(3), 259–266. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00149-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00149-0)
- Cazorla, C. R., Baigorria, T., Videla Mensegué, H., Canale, A., Ortiz, J., & Pegoraro, V. (2018). Inclusión de cultivos de cobertura en secuencias agrícolas del sudeste de Córdoba (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 29, 18–22.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M. E., & Sadras, V. O. (2003). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En E. H. Satorre, R. L. Benech Arnold, G. A. Slafer, E. B. De la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de cultivos de granos. bases funcionales para su manejo* (pp. 375–442). Editorial Facultad de Agronomía. <http://hdl.handle.net/102.100.100/193161?index=1>
- de Sá Pereira, E., Galantini, J. A., & Quiroga, A. R. (2017). Calidad de cultivos de cobertura en sistemas de siembra directa del sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 337–350.
- De Battista, J. J., & Arias, N. (2016). Utilización de la cama de pollo como fertilizante en cultivos anuales, en suelos Vertisoles de Entre Ríos. En J. M. Gange (Ed.), *Cama de pollo en Entre Ríos: Aportes para su uso y manejo* (pp. 70–75). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://bit.ly/3QbmCM0>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2016). *InfoStat versión 2016*. Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar/>
- Divito, G. A., Correndo, A. A., & García, F. O. (2017). La nutrición del cultivo de trigo. En G. A. Divito, & F.O. García (Eds.), *Manual del cultivo de trigo* (pp. 67–84). International plant nutrition institute. <https://bit.ly/3SD5ctf>
- Ferrari, M. (2010). ¿Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 48, 6–10.

- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in plant science*, 10, Article 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Lauric, A., Marinissen, A., & Loewy, T. (2010). *Fertilización orgánica con guano de pollo sobre el rendimiento del cultivo de trigo y la fertilidad del suelo (Campaña 2009-2010)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://bit.ly/3vRAXF2>
- Micucci, F., & C. Álvarez. (2004). El agua en los cultivos extensivos III: Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. *Archivo Agronómico*, 8, 1–4.
- Rattalino Edreira, J. I. R., Guilpart, N., Sadras, V., Cassman, K. G., van Ittersum, M. K., Schils, R. L., & Grassini, P. (2018). Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>
- Rimski-Korsakov, H., Rubio, G., & Lavado, R. S. (2004). Potential nitrate losses under different agricultural practices in the Pampas region, Argentina. *Agricultural Water Management*, 65(2), 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.08.003>
- Sadras, V. O., & McDonald, G. (2012). *Water use efficiency of grain crops in Australia: Principles, benchmarks and management*. Grains Research and Development Corporation, South Australian Research and Development Institute, & University of Adelaide.
- Sarwar, G., Hussain, N., Schmeisky, H., & Muhammad, S. (2007). Use of compost an environment friendly technology for enhancing rice-wheat production in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), 1553–1558.
- Taylor, S. H., Hulme, S. P., Rees, M., Ripley, B. S., Ian Woodward, F., & Osborne, C. P. (2010). Ecophysiological traits in C₃ and C₄ grasses: a phylogenetically controlled screening experiment. *New Phytologist*, 185(3), 780–791. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03102.x>
- Tomaz, A., Patanita, M., Guerreiro, I., Dôres, J., Boteta, L., & Palma, J. F. (2018). Efficient use of water and nutrients in irrigated cropping systems in the Alqueva region. *Spanish Journal of Soil Science*, 8(1), 12–23. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N1.02>
- van Duinen, R. V., Filatova, T., Geurts, P., & van der Veen, A. (2015). Empirical analysis of farmers' drought risk perception: Objective factors, personal circumstances, and social influence. *Risk analysis*, 35(4), 741–755. <https://doi.org/10.1111/risa.12299>
- Vasco Silva, J., Reidsma, P., & van Ittersum, M. K. (2017). Yield gaps in Dutch arable farming systems: analysis at crop and crop rotation level. *Agricultural Systems*, 158, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.005>
- Vasco Silva, J. V., Tenreiro, T. R., Spätjens, L., Anten, N. P. R., van Ittersum, M. K., & Reidsma, P. (2020). Can big data explain yield variability and water productivity in intensive cropping systems? *Field Crops Research*, 255, Article 107828. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107828>
- Voisin, A.I., Pellegrini, A.E., Chamorro, A.M., Bezus, R., Novillo, B.V., & Golik, S.I. (2022). Cultivos de cobertura y diferentes tipos de compost en barbechos para soja y maíz. *Investigación Joven*, 8(2), 9–17.
- Xiao, J., Sun, G., Chen, J., Chen, H., Chen, S., Dong, G., Gao, S., Guo, H., Guo, J., Han, S., Kato, T., Li, Y., Lin, G., Lu, W., Ma, M., McNulty, S.G., Shao, C., Wang, X., Xie, X., ... Zhou, J. (2013). Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.08.007>