

## COMPARACIÓN DE DIFERENTES BASES DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE HUMEDAD DEL SUELO Y RENDIMIENTO DEL TRIGO EN LAS PRINCIPALES ZONAS CEREALISTAS DE ESPAÑA

P. Benito-Verdugo\*, J. Martínez-Fernández, L. Almendra-Martín, Á. González-Zamora, C.M. Herrero-Jiménez y J. Gaona<sup>1</sup>

Instituto Hispano Luso de Investigaciones Agrarias, (CIALE). Universidad de Salamanca. C/ Duero, 12, 37185 Villamayor, Salamanca. pilarBV@usal.es, <http://campus.usal.es/~hidrus>

**RESUMEN.** Se ha empleado la base de datos satelital CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*), la del modelo Lisflood, LF, (*Joint Research Centre, European Commission*) y la base de datos de reanálisis ERA5-Land (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*), para analizar y comparar su idoneidad en el estudio de la variabilidad en el rendimiento del trigo y la detección de los periodos críticos relacionados con la disponibilidad de humedad en el suelo a lo largo del ciclo fenológico. El análisis se ha realizado con el rendimiento anual del trigo para el periodo 1978-2018 en Castilla y León y Castilla-La Mancha, tanto a escala regional como provincial. En los análisis realizados se observa un patrón más definido para LF y ERA5, aunque todos los resultados muestran la existencia clara de un periodo crítico en relación con el papel que juega la humedad del suelo en el rendimiento del trigo en España.

**ABSTRACT.** The CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*), the Lisflood model, LF, (*Joint Research Center, European Commission*) and the reanalysis ERA5-Land (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*) databases were used to analyze and compare its suitability for the study of wheat yield variability, as well as, the detection of critical periods related to soil water availability along the phenological cycle period. The analysis has been made with the annual wheat yield for the period 1978-2018 in Castilla y León and Castilla-La Mancha, at regional and provincial scales. The correlation analyses show differences depending on the satellite database used. However, all the results show an evident critical period in the crop cycle.

### 1.- Introducción

En la agricultura mundial, los cereales ocupan un papel muy importante, ya que de su producción depende gran parte de la alimentación de la población. En España, el cultivo de los cereales, según información del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/produccion-s-agricolas/cultivos-herbaceos/cereales/>), representa la mayor extensión territorial de superficie agrícola, siendo las principales regiones cerealistas Castilla y León y Castilla la Mancha. La producción de trigo blando en Castilla y León es de 2,19 millones de toneladas (casi el 45% del total) y la

de Castilla la Mancha es de 0,261 millones de toneladas (un 12,7% de la producción total).

España es un país eminentemente mediterráneo, donde predomina la agricultura de secano, suponiendo ésta el 87% de la superficie agrícola útil total (Ministerio de Agricultura, Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2008, 2008). En la agricultura de secano los condicionantes ambientales son determinantes para el correcto desarrollo de los cultivos, estando las producciones directamente afectadas por las variaciones climatológicas. Asimismo, el cambio climático será un factor determinante del futuro de la agricultura en la región mediterránea, principalmente por imponer más presión sobre los ya escasos recursos hídricos (Iglesias et al., 2011).

Las fases fenológicas de los cereales están influenciadas por distintas variables, determinando el rendimiento final del cultivo. Los factores climáticos que influyen en la fenología y rendimiento de los cultivos son diversos: temperatura, precipitación, radiación solar, viento, etc. (WMO, 2010). Los factores que se utilizan frecuentemente para analizar las variaciones en el rendimiento de los cultivos son de tipo climático (Iglesias y Quiroga, 2007; Rodríguez-Puebla et al., 2007). De entre las variables climáticas utilizadas para estudiar su efecto en el rendimiento de los cereales, predominan la precipitación y temperatura (Noriega et al., 2011; Ruiz et al., 2008; López-Castañeda, 2006).

Se ha estudiado la temperatura, ya que el estrés térmico afecta directamente al rendimiento de estos cultivos (Argente Martínez et al., 2017). Durante la etapa reproductiva, el estrés por altas temperaturas provoca la disminución de la cantidad y tamaño de las flores (Sharma et al., 2015), del peso de los granos y, como consecuencia, del rendimiento del cultivo (Wang et al., 2015). Por el contrario, se observa que las bajas temperaturas, con un rango entre -5 °C y 16 °C, permiten la vernalización, con un efecto máximo entre 0 °C y 8 °C (Roberts et al., 1988).

La precipitación se utiliza por considerarse significativamente asociada al rendimiento del grano, siendo determinante la precipitación acumulada entre el mes de abril y la fecha de madurez fisiológica (López-Castañeda, 2006). Se ha observado en diversos estudios realizados en sistemas de secano, la existencia de una relación positiva entre la precipitación registrada en la fase de crecimiento y el rendimiento del grano (López-Castañeda y Richards, 1994; Turner, 1997; Asseng et al., 2001a; Sadras et al., 2002; Araus et al., 2003).

El seguimiento de la variabilidad de la humedad del

suelo a lo largo del tiempo es fundamental para estimar los límites del agua disponible, requiriendo bases de datos de alta calidad, que sean suficientemente largas, continuas y consistentes en el tiempo y el espacio (Dorigo et al., 2017; Findell et al., 2015; Loew, 2014). No obstante, a pesar de que se conoce que la disponibilidad de agua en el suelo es uno de los principales factores limitantes de la producción agrícola en ambientes mediterráneos (Medrano et al., 2007), pocas veces se emplea esta variable en el análisis, debido a la insuficiente disponibilidad de bases de datos adecuadas.

En el presente trabajo, se han comparado diferentes bases de datos de humedad del suelo en la zona radicular con el objeto de determinar su adecuación para el estudio de la variabilidad del rendimiento del trigo y la identificación de los periodos críticos a lo largo del ciclo fenológico del cultivo. Se han empleado la base de datos de satélite *Climate Change Initiative* (CCI), la generada por el modelo Lisflood y, por último, la base de datos de reanálisis de ERA5-Land. Asimismo, se han empleado los datos de rendimiento del trigo en secano (tanto duro como blando) obtenidos del anuario de estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. El análisis se ha llevado a cabo a escala provincial y regional en las Comunidades Autónomas de Castilla y León y Castilla-La Mancha, para el periodo comprendido entre 1978 y 2018.

## 2.- Materiales y métodos

### 2.1. Datos de rendimiento del trigo

Los datos del rendimiento del trigo se han obtenido del anuario de estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2020), a escala anual, obteniendo un dato por provincia y región para cada uno de los años estudiados, desde el 1978 hasta el 2018. Para efectuar el análisis, se ha generado una base de datos de rendimiento del trigo utilizando datos de rendimiento total en grano (kg/ha), sin tener en cuenta la dureza del grano y en sistema de secano. Los datos se han obtenido para cada una de las provincias de las Comunidades Autónomas de Castilla y León y Castilla la Mancha, así como la serie regional.

### 2.2. Base de datos CCI

La base de datos de humedad del suelo CCI (*Climate Change Initiative, European Space Agency*) combina varios sensores de microondas activos y pasivos (Dorigo et al., 2017), disponiendo de una resolución espacial de 25x25 km desde el año 1978 hasta 2020 y una resolución temporal diaria. Asimismo, proporciona datos de humedad del suelo superficial (0-5 cm), la cual, ha permitido calcular la humedad diaria en la zona radicular (0-100 cm) aplicando el modelo *Soil Water Index* (SWI) y siguiendo la metodología expuesta en González-Zamora et al. (2016) y Pablos et al. (2018). De esta forma, se ha obtenido una serie de humedad del suelo en la zona radicular para cada píxel.

### 2.3. Base de datos Lisflood

Lisflood (LF) es un modelo hidrológico de lluvia-escurrentía que ha sido desarrollado a partir de finales de los años noventa por “*The floods group of Natural Hazards Project of the Joint Research Centre (JRC) of the European Comission*” (Burek et al. 2013). Presenta una escala espacial de 5x5 km y una resolución temporal diaria, con datos desde 1991 hasta 2020. Proporciona humedad del suelo a tres capas de profundidad diferentes en cada píxel, pero en este trabajo se han seleccionado únicamente las dos primeras capas (0-100 cm) y se ha promediado el valor de la humedad, obteniendo así la serie de la humedad en la zona radicular (0-100 cm).

### 2.4. Base de datos ERA5-Land

ERA5-Land es la última base de datos de reanálisis global generada por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*, ECMWF (Dee et al. 2011), después de sus antecesoras FGGE, ERA-15, ERA-40 y ERA-Interim (Hersbach et al., 2020). La base de datos de reanálisis ERA5-Land (en adelante, ERA5), combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos (Ramírez Pérez et al., 2019). Los datos de humedad del suelo presentan una resolución temporal horaria y una resolución espacial de 10 km desde el año 1981 hasta 2020.

Para este análisis, la humedad del suelo se ha obtenido mediante el promedio de las tres capas en profundidad provenientes de ERA5 a las 12 am y a las 12 pm, obteniéndose así el valor diario de la humedad en la zona radicular (0-100 cm) desde 1978 hasta 2018.

### 2.5. Metodología

En las tres bases de datos utilizadas (CCI, LF y ERA5), se han seleccionado los píxeles con un uso de suelo agrícola para las regiones de Castilla y León y Castilla-La Mancha, así como sus provincias, considerando que el cultivo predominante en todos los casos es el cereal, y se ha realizado el promedio de los valores de cada píxel de cada región y provincia, obteniéndose así, un dato de humedad del suelo medio diario por cada región y provincia.

Además, debido a los avances en la tecnología agrícola, como es el caso de las mejoras en las operaciones mecanizadas y el uso de nuevas variedades y semillas, se ha observado un constante aumento de la productividad (FAO, 2016). A fin de excluir el factor tecnológico del rendimiento del trigo y dejar solamente la que es debida a factores ambientales, se eliminó la tendencia en las series de rendimiento empleando el método utilizado por Potopová et al. (2015).

El análisis de la influencia de la humedad del suelo en la variabilidad del rendimiento del trigo, se ha llevado a cabo mediante un de análisis de correlación, calculando

el coeficiente de correlación de Pearson (R) entre las series de datos de CCI, LF y ERA5 de cada día del ciclo fenológico del cultivo y las series de datos de rendimiento anual, utilizando la media móvil de 30 días, ya que, según Almendra-Martín et al. (2019) se constata que el patrón aparece mucho más definido para la ventana de 30 días que para las ventanas de 5, 7 y 15 días.

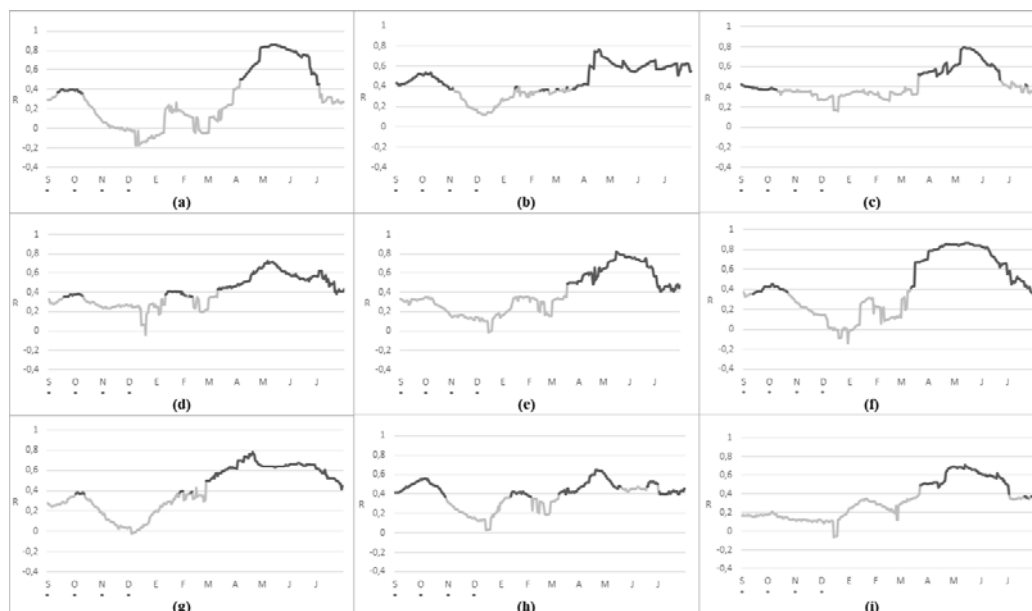
El análisis se ha realizado a escala provincial y regional en Castilla y León y Castilla-La Mancha, para el periodo comprendido entre 1978 y 2018, considerando la campaña agrícola desde el día 1 de septiembre del año previo, hasta el 31 de julio del año correspondiente (334 días). Como resultado de los análisis de correlación, se ha obtenido una serie de 334 valores de R para cada caso a escala provincial y regional y se han identificado aquellos valores con significación estadística ( $p < 0.05$ ).

Además, se ha realizado el análisis a escala mensual, mediante el cálculo del promedio R de cada uno de los meses y para cada base de datos de humedad a nivel regional y provincial, obteniendo como resultado una serie de 11 valores de R.

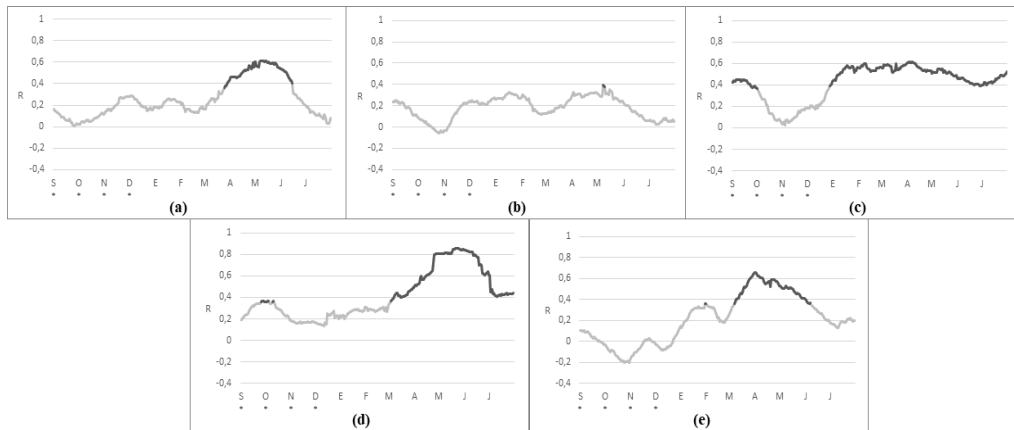
### 3.- Resultados y discusión

Los resultados de los análisis de correlación realizados entre la humedad del suelo en la zona radicular y el rendimiento del trigo en sistema de secano, ponen de manifiesto diferencias entre las tres bases de datos analizadas, así como la relación directa entre el rendimiento

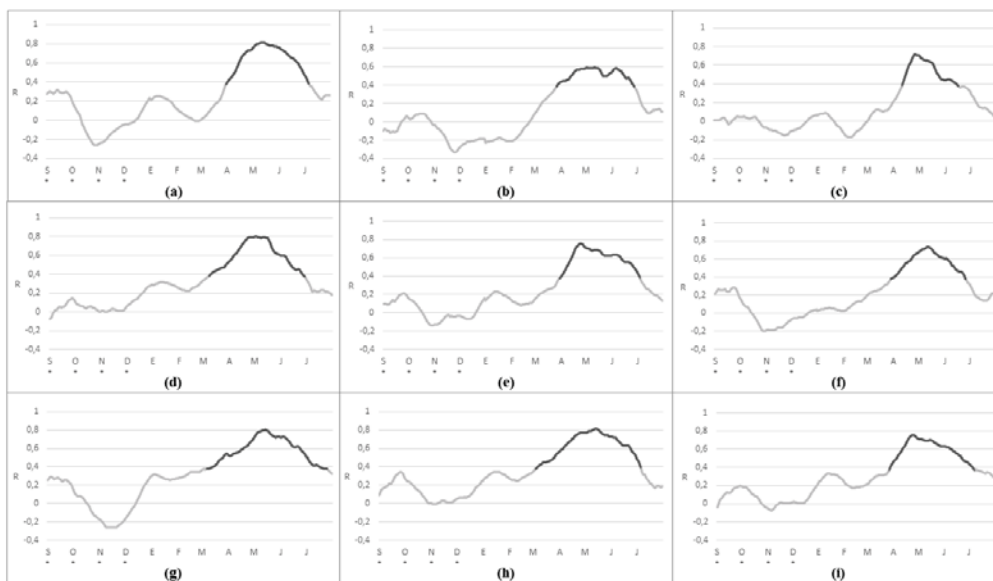
del trigo en ambas regiones y provincias, y el contenido de agua del suelo. Además, los resultados permiten identificar los periodos críticos para el cultivo, es decir, aquellas etapas fenológicas del cultivo del trigo en las que la humedad del suelo es más determinante para el rendimiento. La correlación resultante del análisis diario de las tres bases de datos a escala regional y provincial, presenta un periodo (marzo a junio) en el que la relación entre ambas variables es significativa. Además, en los resultados obtenidos en el análisis diario de la base de datos CCI a escala provincial, se observa tres periodos con significación estadística en las provincias de Burgos, Palencia, Soria y Valladolid (Fig. 1). Por un lado, en el mes de octubre coincidiendo con la fase de germinación y nascencia; por otro lado, en el mes de febrero coincidiendo con la fase de macollado y, por último, en los meses de marzo a junio coincidiendo con el periodo comprendido entre la fase de encañado y la fase de madurez fisiológica del cultivo. Sin embargo, las provincias de Ávila, León, Segovia, Cuenca y Guadalajara (Figs. 1 y 2) presentan únicamente dos periodos con significación estadística (octubre y marzo a junio), no así el periodo coincidente con la fase de macollado. Por último, en las provincias de Salamanca, Zamora, Albacete, Ciudad Real y Toledo (Figs. 1 y 2), se observa únicamente el periodo coincidente con la etapa de reproducción y maduración, al igual que lo obtenido con las bases de datos de LF (Fig. 3) y ERA5 (Fig. 4), cuyos resultados son similares, observándose únicamente el periodo comprendido entre la fase de encañado y la fase de madurez fisiológica del cultivo.



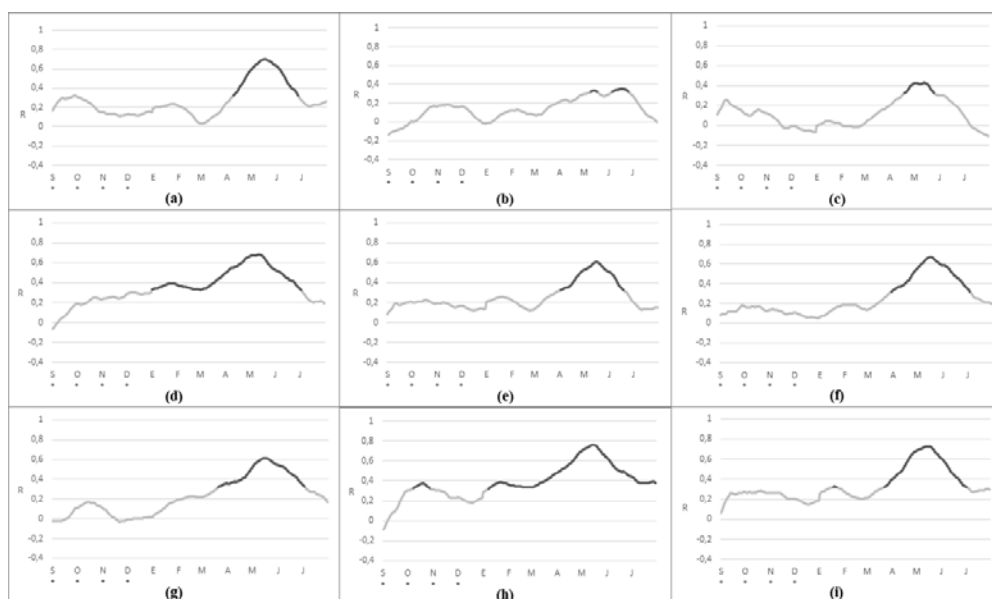
**Fig 1.** Valores diarios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y la humedad del suelo CCI para la media móvil de 30 días. Datos con significación estadística,  $p < 0,05$  (línea negra) en a) Ávila, b) Burgos, c) León, d) Palencia, e) Salamanca, f) Segovia, g) Soria, h) Valladolid e i) Zamora.



**Fig 2.** Valores diarios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla-La Mancha y la humedad del suelo CCI para la media móvil de 30 días. Datos con significación estadística,  $p < 0,05$  (línea negra). (a) = Albacete, (b) = Ciudad Real, (c) = Cuenca, (d) = Guadalajara y (e) = Toledo.



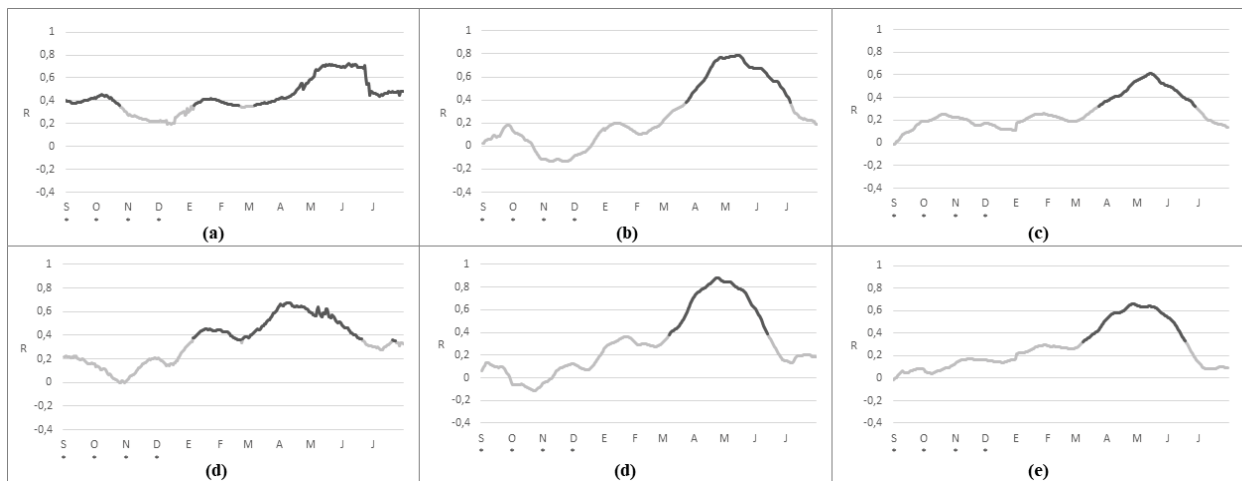
**Fig 3.** Valores diarios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y la humedad del suelo LF para la media móvil de 30 días. Datos con significación estadística,  $p < 0,05$  (línea negra) en a) Ávila, b) Burgos, c) León, d) Palencia, e) Salamanca, f) Segovia, g) Soria, h) Valladolid e i) Zamora.



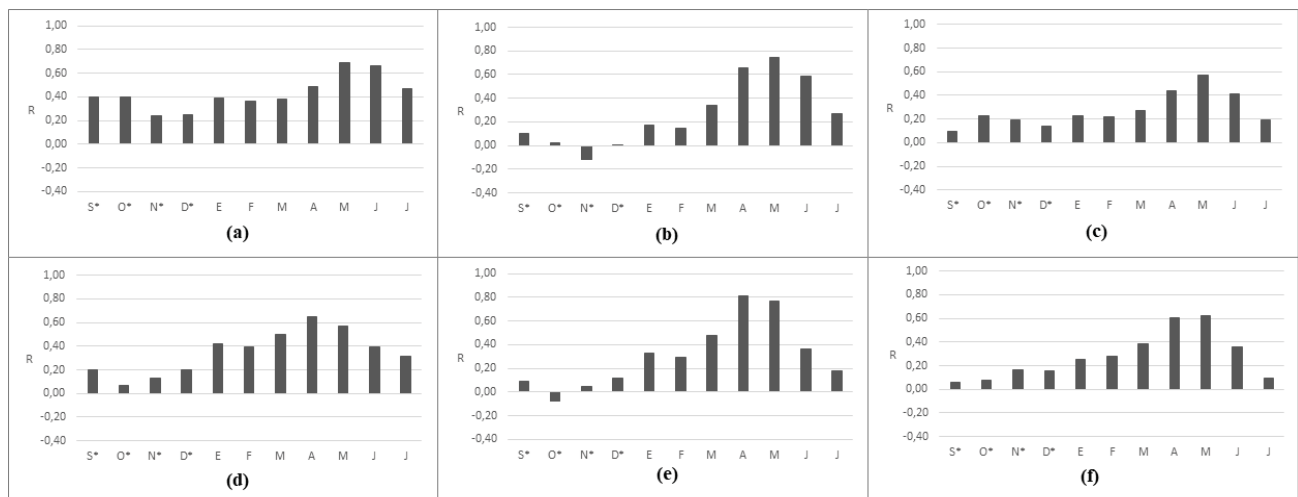
**Fig 4.** Valores diarios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y la humedad del suelo ERA5 para la media móvil de 30 días. Datos con significación estadística,  $p < 0,05$  (línea negra) en a) Ávila, b) Burgos, c) León, d) Palencia, e) Salamanca, f) Segovia, g) Soria, h) Valladolid e i) Zamora.

Por lo tanto, los resultados evidencian que el periodo más relevante es aquel que comprende la etapa de reproducción y de maduración (marzo a junio), es decir, desde la fase de encañado hasta la fase de madurez fisiológica del cultivo. Como ya se observó con la base de datos de satélite CCI (Almendra et al. 2019), se repite este patrón de existencia de periodos críticos con productos de humedad del suelo de características completamente diferentes. En efecto, si bien las tres bases de datos permiten detectar claramente dicho patrón a escala diaria (Fig. 5) y mensual (Fig. 6) entre el rendimiento del trigo y el contenido de agua en el suelo en ambas regiones, las bases de datos LF y ERA5

proporcionan un resultado más definido, en comparación con CCI. Dicha diferencia entre los resultados obtenidos puede ser debida a la resolución espacial ya que la base de datos CCI tiene una resolución espacial de 25 km, a diferencia de LF y ERA5 que tienen una resolución más fina, de 5 km y 10 km respectivamente. Además, los resultados del análisis de correlación obtenidos con el modelo LF presentan los valores más altos de R, en comparación con el resto de bases de datos, destacando secundariamente la base de datos de reanálisis ERA5, la cual, presenta los valores más bajos de R.



**Fig 5.** Valores diarios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y Castilla-La Mancha y la humedad del suelo CCI, LF y ERA5 para la media móvil de 30 días. Datos con significación estadística,  $p < 0,05$  (línea negra) en a) CyL CCI, b) CyL LF, c) CyL ERA5, d) CM CCI, e) CM LF y f) CM ERA5.



**Fig 6.** Valores mensuales medios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla y León y Castilla-La Mancha y la humedad del suelo CCI, LF y ERA5 para la media móvil de 30 días en a) CyL CCI, b) CyL LF, c) CyL ERA5, d) CM CCI, e) CM LF y f) CM ERA5.

Si se analizan los resultados a escala mensual, se observa con mayor definición el patrón temporal tanto a escala regional (Fig. 6) como provincial (Figs. 7, 8 y 9). Además, tal y como se comentó anteriormente en referencia a la escala diaria, sucede lo mismo con los resultados obtenidos con los diferentes productos de

humedad a escala mensual, obteniéndose un resultado más definido con LF (Fig. 8) y ERA5 (Fig. 9), en comparación con CCI (Fig. 7).

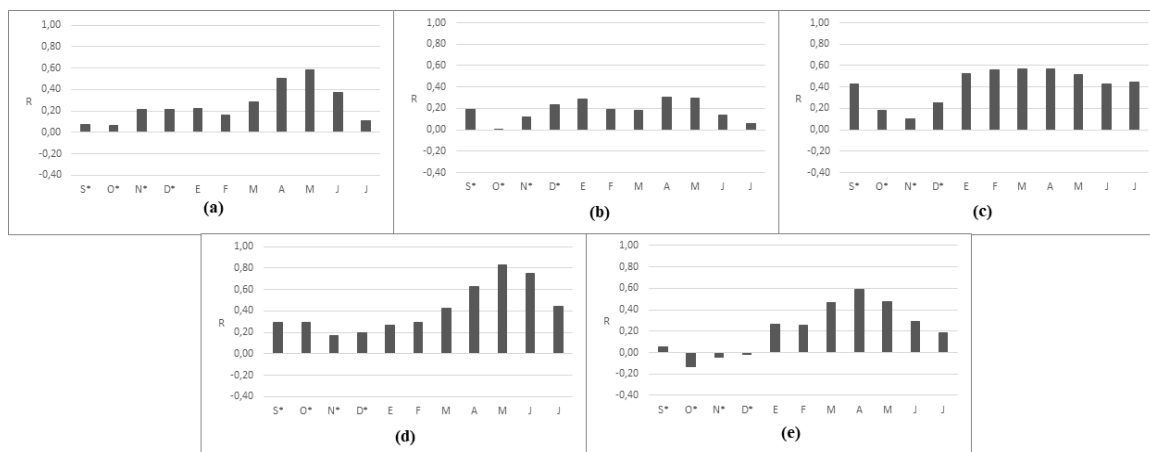


Fig 7. Valores mensuales medios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla-La Mancha y la humedad del suelo CCI para la media móvil de 30 días en a) Albacete, b) Ciudad Real, c) Cuenca, d) Guadalajara y e) Toledo.

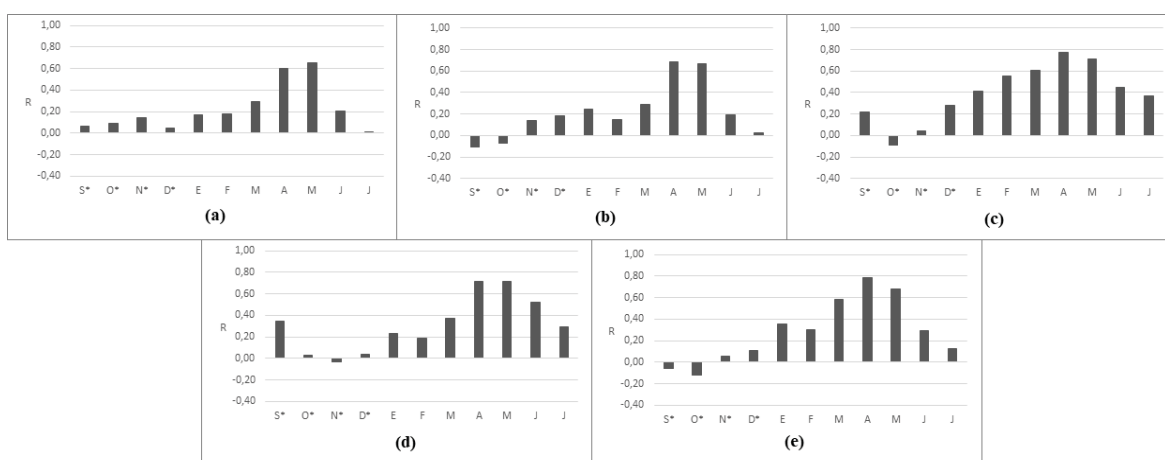


Fig 8. Valores mensuales medios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla-La Mancha y la humedad del suelo LF para la media móvil de 30 días en a) Albacete, b) Ciudad Real, c) Cuenca, d) Guadalajara y e) Toledo.

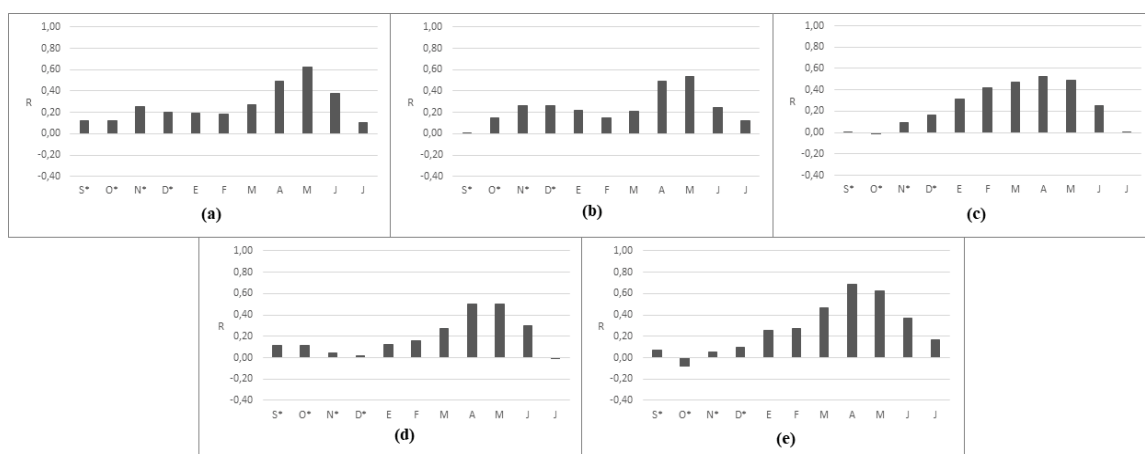


Fig 9. Valores mensuales medios de R entre el rendimiento del trigo en Castilla-La Mancha y la humedad del suelo ERA5 para la media móvil de 30 días en a) Albacete, b) Ciudad Real, c) Cuenca, d) Guadalajara y e) Toledo.

Como resultado de los análisis de correlación mensual (Tabla 1) entre ambas variables a escala provincial y regional, se observa la existencia de un pequeño desfase temporal en el papel de la humedad del suelo a lo largo del ciclo fenológico entre las dos regiones. En Castilla-La

Mancha, el coeficiente de correlación es predominante en el mes de abril, mientras que, en Castilla y León, lo es en el mes de mayo. Esto puede explicarse por la situación más meridional de Castilla-La Mancha, y la existencia del gradiente término latitudinal (Capel Molina, 1998). Dicha



situación unido a que cada fase de desarrollo del cultivo requiere de un mínimo de acumulación de temperatura para llegar a su término (Rawson y Gómez, 2001), explica que se llegue antes al fin del ciclo del cultivo en Castilla-La Mancha.

En el análisis (Tabla 1) de los resultados mensuales obtenidos en los análisis de correlación para cada uno de los productos de humedad, se observa una evidente diferencia entre ambas regiones, predominando en Castilla y León y sus provincias el mes de mayo como el mes con un valor promedio de R más alto en todos los casos. Páscoa et al. (2017) observaron que las condiciones del mes de mayo ejercían un gran control sobre la producción de trigo en la Península Ibérica. Por el contrario, en Castilla-La Mancha el mes predominante es abril, con un valor

promedio de R más alto, excepto en la provincia de Albacete.

El mes en el que sucede la máxima mensual de R entre el rendimiento del trigo y la humedad del suelo CCI, LF y ERA5 en las provincias y regiones de Castilla y León y Castilla-La Mancha, es similar para LF y ERA5 pero, difiere entre estas dos y CCI, como se ha constatado anteriormente a escala diaria. Cabe señalarse la provincia de Burgos que, en cada uno de los análisis realizados con cada uno de los productos de humedad del suelo, el mes con un coeficiente de correlación (R) máximo es diferente en cada uno de los tres resultados obtenidos, manifestándose el mes de abril en CCI, el mes de mayo en LF y el mes de junio en ERA5.

**Tabla 1.** Máxima media mensual de R entre el rendimiento del trigo y la humedad del suelo CCI, LF y ERA5 en las provincias y regiones de Castilla y León y Castilla-La Mancha.

Provincia y región	CCI		LF		ERA5	
	R Máx.	Mes	R Máx.	Mes	R Máx.	Mes
Ávila	0,84	Mayo	0,79	Mayo	0,66	Mayo
Burgos	0,63	Abril	0,55	Mayo	0,33	Junio
León	0,73	Mayo	0,58	Mayo	0,38	Mayo
Palencia	0,66	Mayo	0,73	Mayo	0,63	Mayo
Salamanca	0,75	Mayo	0,66	Mayo	0,56	Mayo
Segovia	0,85	Mayo	0,68	Mayo	0,63	Mayo
Soria	0,70	Abril	0,76	Mayo	0,58	Mayo
Valladolid	0,57	Abril	0,77	Mayo	0,72	Mayo
Zamora	0,67	Mayo	0,68	Mayo	0,69	Mayo
Toledo	0,59	Abril	0,78	Abril	0,68	Abril
Albacete	0,59	Mayo	0,65	Mayo	0,63	Mayo
Ciudad Real	0,31	Abril	0,69	Abril	0,54	Mayo
Cuenca	0,57	Abril	0,78	Abril	0,52	Abril
Guadalajara	0,83	Mayo	0,71	Abril/mayo	0,50	Abril/mayo
CyL	0,69	Mayo	0,74	Mayo	0,57	Mayo
CM	0,65	Abril	0,82	Abril	0,62	Mayo

#### 4.- Conclusiones

El uso de la humedad del suelo satelital y modelizada puede ser viable y útil para el estudio de la variabilidad de la producción agrícola. La humedad del suelo en la zona radicular es una variable determinante para el análisis del ciclo de los cultivos agrícolas. Sin embargo, la humedad del suelo no se utiliza habitualmente en el estudio de los ciclos de cultivos por la escasez de series adecuadas de larga duración.

En el presente estudio se demuestra que la humedad del suelo procedente de información satelital y modelizada es suficientemente sensible para determinar el patrón temporal de productividad del cultivo y delimitar los periodos críticos en las diferentes etapas del ciclo fenológico. Los análisis realizados en las principales regiones cerealistas de España, Castilla y León y Castilla-La Mancha, han reflejado la importancia del contenido de agua del suelo en las etapas de reproducción y maduración predominantemente, a la vista de los resultados obtenidos con significación estadística. Además, se ha visto que las bases de datos LF y ERA5, procedentes de modelización y reanálisis, respectivamente, reportan un resultado más definido del

patrón del cultivo en comparación con la serie de información satelital. Esto puede deberse a la resolución espacial de CCI, que puede resultar inadecuada en zonas donde la distribución de usos del suelo no es homogénea. Además, en el análisis de correlación, la base de datos LF muestra valores mayores de R, pudiéndose deber a la mejor resolución espacial (5x5 km) de las tres bases de datos estudiadas.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, ponen de manifiesto la utilidad del uso de la humedad del suelo en el análisis de la relación entre la productividad agrícola y los factores ambientales, así como la necesidad de utilizar productos de humedad del suelo con mejor resolución espacial y temporal.

*Agradecimientos.* Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (Proyecto ESP2017-89463-C3-3-R), la Junta de Castilla y León (Proyecto SA112P20), el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el proyecto Unidad de Excelencia CLU-2018-04, cofinanciado por FEDER y la Junta de Castilla y León.

## 5.- Bibliografía

- Almendra-Martín, L., C.M. Herrero-Jiménez, J. Martínez-Fernández, Á. González-Zamora y N. Sánchez, 2019. Uso de la humedad del suelo satelital para el análisis de la variabilidad de la producción de trigo: el caso de Castilla y León. *Estudios en la zona no saturada del suelo*. 14, 43-48.
- Araus, J. L., D. Villegas, N. Aparicio, L. F. García del Moral, S. El Haini, Y. Rharrabti, J. P. Ferrio y C. Royo. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Science*. 43, 170-180.
- Argente Martínez, L., J. Garatza Payán, M.M. Armendáriz Ontiveros, E.A. Yépez González, J.T. Arredondo Moreno, y J. González Aguilera, 2017. Estrés térmico en cultivo del trigo. Implicaciones fisiológicas, bioquímicas y agronómicas. *Cultivos Tropicales*. 38(1), 57-67.
- Asseng, S., F. X. Dunin, I. R. P. Fillery, D. Tennant y B. A. Keating, 2001a. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate: II. Management opportunities to control drainage. *Australian Journal of Agricultural Research*. 52, 57-66.
- Burek P, J. Van Der Knijff y A. De Roo, 2013. LISFLOOD, distributed water balance and flood simulation model. *JRC Technical reports*.
- Capel Molina, J.J., 1998. Ritmo anual de las temperaturas en España. *NIMBUS*, 1-2, 17-36.
- Dee, D.P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. Van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A.J. Geer, L. Haimberger, S.B. Healy, H. Herbach, E.V. Hólm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Köhler, M. Matricardi, A.P. McNally, B.M. Mongue-Sanz, J.J. Morcrette, B.K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.N. Thépaut, F. Vitart, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 137, 553-597.
- Dorigo, W., W. Wagner, C. Albergel, F. Albrecht, G. Balsamo, L. Brocca, D. Chung, M. Ertl, M. Forkel, A. Gruber, E. Haas, P.D. Hamer, M. Hirschi, J. Ikonen, R.A.M. de Jeu, R. Kidd, W. Lahoz, Y.Y. Liu, D. Miralles, T. Mistelbauer, N. Nicolai-Shaw, R.M. Parinussa, C. Pratola, C. Reimer, R. van der Schalie, S. Seneviratne, T. Smolander, y P. Lecomte, 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*. 203, 185-215.
- FAO, 2016. Save and grow in practice maize, rice, wheat. A guide to sustainable cereal production. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome. 111 pp.
- Findell, K. L., P. Gentile, B.R. Lintner, y Guillodhip, B. P., 2015. Data length requirements for observational estimates of land-atmosphere coupling strength. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1615-1635.
- González-Zamora, A., N. Sánchez, J. Martínez-Fernández, y W. Wagner, 2016. Root-zone plant available water estimation using the SMOS derived Soil Water Index. *Advances in Water Resources*. 96, 339-353.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R.J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnav, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume y J.N. Thépaut (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146, 1999-2049.
- Iglesias, A., y S. Quiroga, 2007. Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. *Climate Research*. 34, 47-57.
- Iglesias, A., R. Mougou, M. Moneo y S. Quiroga, 2011. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*. 11, 159-166.
- Loew, A., 2014. Terrestrial satellite records for climate studies: how long is long enough? A test case for the Sahel. *Theoretical and Applied Climatology*. 115, 427-440.
- López-Castañeda, C., 2006. Eficiencia en el uso de la precipitación en cereales en ambientes de secano. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 477-487.
- López-Castañeda, C. y R.A. Richards, 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Res*. 39: 85-98.
- MAPA, 2020. Anuario de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx>. [consulta: octubre 2020]
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, Josep, J. Flexas, M. Ribas-Carbó y J. Gulías, 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas (Esp)*. 43, 63-84.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/cereales/>. [consulta: febrero 2021]
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2008. Obtenido de <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/plan-nacional-regadios/texto-completo/>. [consulta: febrero 2021]
- Noriega, L. A.; R.E. Preciado, E. Andrio; A.D. Terrón y J.C., 2011. Prieto. Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C\*. *Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2 (4), 489-500.
- Pablos, M., A. González-Zamora, J. Martínez-Fernández, y N. Sánchez, 2018. Assessment of root zone soil moisture estimations from SMAP, SMOS and MODIS observations. *Remote Sensing*. 10, 981.
- Páscoa, P., C. M. Gouveia, A. Russo y R. M. Trigo, 2017. The role of drought on wheat yield interannual variability in the Iberian Peninsula from 1929 to 2012. *International Journal of Biometeorology*. 61, 439-451.
- Potopová, V., P. Stepánek, M. Mozný, L. Türkott, y J. Soukup, 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*. 202, 26-38.
- Ramírez Pérez, M., M. Menéndez García, P. Camus Braña y I. Losada Rodríguez, 2019. Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. *Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española*. Ministerio para la transición ecológica.
- Rawson, H. M. y H. Gómez, 2001. Trigo regado. *Manejo del cultivo*. FAO. 61.
- Roberts, E.H., R.J. Summerfield, J.P. Cooper y R.H. Ellis, (1988). Environmental control of flowering in barley (*Hordeum vulgare* L.). I Photoperiod limits to long-day responses, photoperiod-insensitive phases and effects of low temperature and short-day vernalization. *Annals of Botany*. 62, 127-144.
- Rodríguez-Puebla, C., M. Ayuso, M. Frías, y L. García-Casado, 2007. Effects of climate variation on winter cereal production in Spain. *Climate Research*. 34, 223-232.
- Ruiz, F. H., P. Marrero, O. Cruz, B. Murillo, y J.L. García, 2008. Agroclimatic factor influences in the basil productivity (*Ocimum basilicum* L.) in anaridarea of Baja California Sur, Mexico. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 17 (1), 44-47.
- Sadras, V., D. Roger y G. O'Leary, 2002. On-farm assessment of environmental and management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Mallee. *Australian Journal of Agricultural Research*. 53, 587-598.
- Sharma, D.K.; S.B. Andersen, C.O. Ottosen y E. Rosenqvist, 2015. Wheat cultivars selected for high Fv/Fm under heat stress maintain high photosynthesis, total chlorophyll, stomatal conductance, transpiration and dry matter. *Physiologia Plantarum*. 153 (2), 284-298.
- Turner, N.C, 1997. Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy*. 58, 293-338
- Wang, X.; B.S. Dinler, M. Vignjevic, S. Jacobsen y B. Wollenweber, 2015. Physiological and proteome studies of responses to heat stress during grain filling in contrasting wheat cultivars. *Plant Science*. 230, 33-50.
- World Meteorological Organization (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO-No, 134