

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Agroalimentària

Títol: Comparación entre riego por inundación y goteo en arroz en el Bajo Ter: aspectos agronómicos

Document: Memòria

Alumne: Marina Llobet Escabias

Tutor: Francesc Ramírez de Cartagena i Bisbe i Miquel Duran i Ros

Departament: d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia
Agroalimentària

Àrea: Enginyeria Hidràulica, Enginyeria Agroforestal

Convocatòria (mes/any): Juny / 2018

Esta página se ha dejado en blanco de forma intencionada

ÍNDICE DE LA MEMORIA

RESUMEN	7
PALABRAS CLAVE	11
AGRADECIMIENTOS	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Importancia del cultivo del arroz	13
1.1.1. Nivel mundial y de la Unión Europea.....	13
1.1.2. España	15
1.1.3. Catalunya.....	17
1.1.4. Baix Empordà (Girona).....	18
1.2 Riego	18
1.2.1 El agua y la agricultura.....	18
1.2.2 Sistemas de riego.....	20
1.2.3 Riego en arroz	21
1.2.3.1 Riego por inundación.....	22
1.2.3.2 Riego por inundación intermitente.....	25
1.2.3.3 Riego por aspersión.....	26
1.2.3.4 Riego por goteo.....	27
1.3 Fisiología del arroz.....	28
1.3.1 GDD (Growing Degree Days).....	28
1.3.1.1 Degree – Day 50 (DD50).....	28
1.3.2 Morfología.....	29
1.3.2.1 Órganos vegetativos.....	29
1.3.2.2 Órganos reproductivos	30
1.3.3 Fenología.....	31
1.3.3.1 Etapa de plántula.....	31
1.3.3.2 Etapa vegetativa	32

1.3.3.3	Etapa reproductiva	33
2.	OBJETIVOS	35
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1	Localización del ensayo	36
3.2	Características del medio	37
3.2.1	Clima	37
3.2.2	Suelo.....	38
3.2.3	Agua de riego	39
3.3	Sistemas de riego.....	39
3.3.1	Riego por inundación continuo (RIC).....	39
3.3.2	Riego por goteo (RG).....	40
3.4	Variedades	41
3.5	Prácticas culturales	41
3.5.1	Siembra.....	41
3.5.2	Manejo del riego.....	42
3.5.3	Fertilización.....	43
3.5.4	Tratamientos fitosanitarios	44
3.6	Variables determinadas en el ensayo	45
3.6.1	Clima	45
3.6.1.1	Datos agroclimáticos.....	45
3.6.1.2	Grados-día (GDD)	47
3.6.1.3	Evapotranspiración de referencia.....	48
3.6.2	Suelo.....	48
3.6.2.1	Potencial matricial	48
3.6.2.2	Contenido de agua del suelo	48
3.6.3	Agua del freático y de riego	48
3.6.3.1	Nivel freático	48

3.6.3.2	Conductividad eléctrica del agua del freático y de riego	49
3.6.3.3	Conductividad eléctrica del agua del suelo	49
3.6.3.4	Índices de eficiencia del uso del agua	50
3.6.4	Planta	50
3.6.4.1	Estadio fenológico	50
3.6.4.2	Evapotranspiración del cultivo	51
3.6.4.3	Índice de Área Foliar (LAI)	51
3.6.4.4	Densidad de plantas	51
3.6.4.5	Producción	52
3.7	Tratamiento estadístico	54
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1	Análisis del riego y del freático	56
4.1.1	Volúmenes de agua aplicados en riego	56
4.1.2	Contenido volumétrico de agua del suelo	57
4.1.3	Potencial matricial	59
4.1.4	Nivel freático	59
4.1.5	Salinidad del agua del freático	60
4.1.6	Salinidad del agua de riego y de drenaje	61
4.1.7	Conductividad eléctrica del suelo	61
4.1.8	Producciones	62
4.1.9	Índices de eficiencia del uso del agua	63
4.2	Caracterización del desarrollo del cultivo	64
4.2.1	Índice de Área Foliar (LAI)	64
4.2.2	Fenología	66
4.2.3	Grados-día (GDD)	67
4.3	Parámetros agroclimáticos	69
4.3.1	Temperatura mediana	69

4.3.2	Temperatura máxima.....	71
4.3.3	Temperatura mínima	73
4.3.4	Precipitación diaria y acumulada	75
4.3.5	Evapotranspiración diaria y acumulada	77
4.3.6	Grados-día y acumulados	79
5.	CONCLUSIONES.....	81
	BILIOGRAFIA.....	84

RESUMEN

El arroz es cultivado en más de 113 países y considerado el primer alimento básico en 34. Proporciona el 20% de la energía alimentaria del planeta y es una buena fuente de fibra, aminoácidos (ácido glutámico y aspártico), tiamina, riboflavina y niacina. Tradicionalmente ha sido cultivado mediante técnicas de inundación permanente pero la falta de recursos hídricos disponibles, el potencial riesgo de contaminación de acuíferos a través de la lixiviación de productos químicos y la emisión de GEI (Gases de Efecto Invernadero), principalmente metano, obliga a experimentar nuevas prácticas agrícolas.

Este Trabajo de Final de Grado se ha realizado en el marco de un proyecto piloto cuya finalidad principal es la creación de Grupos Operativos de la Asociación Europea para la Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícola. El ensayo tiene como objetivo la comparación del sistema de riego de inundación continuo (RIC) y el riego localizado por goteo (RG), así como la demostración en campo a los agricultores de la técnica de riego por goteo en arroz. Otra finalidad del trabajo es estudiar la conveniencia de instalar una estación agroclimática a pie de parcela como alternativa al uso de datos de la estación climática en red más cercana.

Los ensayos experimentales se realizaron en dos campos comerciales en la zona del Baix Ter. El suelo se caracterizó como Xerofluvent Aqüic y el clima como mediterráneo litoral del norte.

En RIC se sembró Onice a voleo con una dosis de 180 kg/ha y en RG se sembró Baldo enterrando la semilla con una sembradora de líneas con una dosis de 150 kg/ha. El RIC se fertilizó con un total de 185 UF de N, 45 UF de P y 45 UF de K mediante un abonado de fondo y uno de cobertera. El RG se abonó con un total de 151 UF de N, 50 UF de P y 53 UF de K con un abonado de fondo y posteriores fertilizaciones por fertirrigación mediante equipo Venturi.

En RIC se instaló un contador volumétrico en carga y un piezómetro para mantener una lámina de agua entre 5 – 10 cm. En RG el sistema de riego se diseñó con laterales cada 0'75 m de cintas de goteo con emisores integrados no autocompensantes cada 0'4 m, y el criterio de riego fue mantener un potencial matricial a 15 cm de profundidad de -10 kPa. En ambos campos se instalaron piezómetros a 1'5 m de profundidad y tres sondas de humedad a una profundidad de 15 cm, 30 cm y 45 cm.

Los dos sistemas de riego se contrastaron haciendo un seguimiento del comportamiento del arroz y del desarrollo del mismo.

El comportamiento del arroz se ha determinado a partir de datos edáficos, hídricos y del cultivo. Se compararon y contrastaron los volúmenes de agua aplicados en riego, el contenido volumétrico del agua del suelo, el nivel freático, el potencial matricial, la salinidad (del suelo y del agua de riego y freática), las producciones y diferentes índices de eficiencia en el uso del agua.

El desarrollo del cultivo se ha caracterizado por el Índice de Área Foliar (LAI) y los estados fenológicos, que posteriormente se han relacionado con los grados-día (siglas en inglés GDD, Growing Degree Days). El LAI se determinó mediante dos procedimientos. El primero de ellos, destructivo, se realizó cada dos semanas escogiendo cuatro plantas al azar de cada campo. El segundo procedimiento, no destructivo, se basó en la determinación semanal de la LAI mediante la aplicación móvil POCKET-LAI. Los estadios fenológicos se caracterizaron según Lancashire et al. (1991).

La conveniencia de instalar una estación agroclimática a pie de parcela se ha estudiado mediante la comparación de diversos parámetros obtenidos de la estación climática instalada en RG con las dos estaciones de la XEMA (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques) más cercanas, en La Tallada d'Empordà y en Monells. Estos parámetros son: las temperaturas medianas, máximas y mínimas, las precipitaciones (diarias y acumuladas), la evapotranspiración (diaria y acumulada) y los grados-día.

En RIC se aplicó un volumen de agua de riego de 14.110 m³/ha, un 70% superior que en RG. El aporte hídrico total (riego + lluvia) fue un 129% y un 44% superior a la ET_c (evapotranspiración del cultivo) en RIC y RG, respectivamente.

El suelo en RIC se mantuvo constantemente en estado de saturación o a valores muy próximos a causa de la presencia de la lámina de agua superficial y el alto nivel freático existente. En RG, a diferencia del RIC, el suelo no estuvo en estado de saturación pero sí a valores cercanos, y en los primeros 15 cm se apreciaron disminuciones del contenido volumétrico y aumentos del potencial matricial causados por paradas de riego.

El nivel freático en RIC y RG fluctuó en el tiempo sin aparente relación con precipitaciones, riegos o prácticas culturales concretas. El manejo del riego de las fincas colindantes probablemente pudo haber influido.

La falta de datos desde el inicio del cultivo ha imposibilitado sacar conclusiones sólidas respecto a la salinidad del freático y el drenaje. La CE (Conductividad Eléctrica) del freático en RG fue un 670% superior a la de RIC, y el agua de drenaje resultó ser un 24'3% y un 13'7% más salina que el agua de riego en RIC y RG, respectivamente.

En RIC la producción obtenida fue un 16'5% superior a los 5.565 kg/ha de RG. De acuerdo con Mass y Hoffman (1977) la salinidad del suelo podría haber provocado una reducción de la producción del 4% en RIC y del 19% en RG. Las conclusiones sobre productividad de RIC y RG de este estudio no pueden ser completamente rigurosas porque se trata de variedades diferentes y por los desiguales niveles de salinidad que, en este caso, perjudicaban la parcela RG.

El RIC presentó una eficiencia en el uso del agua (WUE) y una eficiencia en el uso del agua de riego (IWUE) un 36% y 46% inferiores que en RG. La eficiencia del riego (E_r) obtenida en RG fue del 83%, un 87% superior a la RIC por lo que, en términos de eficiencia hídrica, se puede afirmar que es mejor el sistema de riego por goteo.

Los valores de LAI calculados con el método destructivo en RIC y RG fueron muy elevados, con máximos de $27 \text{ m}^2/\text{m}^2$ y $16 \text{ m}^2/\text{m}^2$, respectivamente, que duplicaban y triplicaban los obtenidos en otros estudios. La difícil diferenciación entre plantas y macollas, y el alto porcentaje de ahijamiento del arroz pudo haber distorsionado estos valores al alza. Los valores máximos de LAI obtenidos con POCKET-LAI fueron de $5'1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ y $3'5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en RIC y RG, respectivamente, con una correlación entre ambos conjuntos de datos baja (0'5).

Los estadios fenológicos en RIC y RG tuvieron un coeficiente muy alto de correlación (0'99) entre ambos conjuntos de datos, lo cual corrobora que los sistemas de riego empleados no influyeron en el desarrollo del cultivo. El RIC llegó al estado de maduración con un 5'1% menos GDD respecto RG pero esta diferencia se puede asociar a la menor longitud del ciclo vegetativo de Onice.

Todos los datos agroclimáticos obtenidos en la estación de la parcela se ajustaron bien a los de La Tallada d'Empordà, por lo que no sería necesario instalar una estación. En cambio, los obtenidos en Monells presentaron desajustes en las temperaturas máximas y las precipitaciones, lo que justificaría la instalación de una estación en el campo.

Se ha comprobado que las precipitaciones están relacionadas con disminuciones de temperaturas, evapotranspiraciones y acumulación de grados-día. Muy probablemente el

menor ajuste de los datos agroclimáticos de la parcela con Monells se deba a que las precipitaciones fueron un 33% inferiores. Por contra, la diferencia del 3% con respecto La Tallada d'Empordà corroboraría el mayor ajuste obtenido.

PALABRAS CLAVE

- Arroz
- Riego por inundación continua
- Riego por goteo
- Índice de Área Foliar (LAI)
- Growing Degree Days (GDD)

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se hubiera podido realizar sin la colaboración de las personas e instituciones que, de forma desinteresada, me han ayudado.

En primer lugar, quiero agradecer a mis dos tutores, el Dr. Miquel Duran y Ros y el Dr. Francesc Ramírez de Cartagena Bisbe, su confianza al hacerme partícipe de este proyecto. Sin su dirección, supervisión y disposición hubiera sido imposible.

Agradecer al Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y a la Generalitat de Catalunya por ayudar económicamente proyectos piloto como el que ha sido enmarcado este trabajo. Asimismo resaltar la inestimable colaboración que han brindado el ADV Arròs de Pals y el agricultor Josep Pericay.

También quiero agradecer al Ingeniero Agrónomo Sergi Parals Bonay por hacer tan fácil la realización de la parte experimental, el tiempo dedicado y los ánimos transmitidos. No puedo olvidar tampoco la ayuda del Dr. Gerard Arbat Pujolràs por compartir sus conocimientos, tiempo y opinión.

Los conocimientos transmitidos por todos los profesores del Grado en Ingeniería Agroalimentaria de la Universidad de Girona me han permitido ejecutar este proyecto. Quiero hacer una mención especial a Paco, Miquel, Gerard, Lluís, Jesús, Pere, Isidre, Concepció, Jaume y Joan.

Mis padres Trini y Eugeni merecen un punto y aparte, no solo por su soporte financiero y de intendencia en el día a día que me ha permitido estudiar este grado, sino sobre todo por su apoyo y paciencia incondicional. Asimismo quiero dar las gracias a toda mi familia materna.

Por último, y no menos importante, agradecer a mis amigos Marta, Gerard, Meritxell, Núria, Anna y Carla por haber sabido estar siempre a mi lado, tanto en los mejores como los peores momentos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del cultivo del arroz

El arroz es una planta herbácea monocotiledónea de ciclo vegetativo anual cuyo aprovechamiento principal es el grano destinado a la alimentación humana y animal. Su origen se remonta a hace 10.000 años en Asia, donde se cultivó y domesticó en China. Llegó al continente europeo sobre el 800 A. C., y a España con la invasión musulmana (MAGRAMA, 2017).

Este cereal se cultiva en 113 países, proporciona el 27% de la energía alimentaria mundial y más del 50% de los 840 millones de personas que padecen hambre crónica dependen de su producción, bien sea para obtener ingresos o para alimentarse (FAO, 2014a).

En el mundo se cultivan miles de variedades, que han desarrollado las diferentes culturas en función de su sabor, textura, viscosidad y color. Cuando tiene cáscara puede adoptar colores como el pardo, rojo, púrpura y negro. En función de la variedad tiene distinto contenido nutricional. Es una buena fuente de vitaminas como la tiamina, riboflavina y niacina. También aporta altos contenidos de aminoácidos, principalmente ácido glutámico y aspártico.

El hecho de ser el alimento básico de 24 países hace imprescindible garantizar su seguridad y calidad. Por ese motivo deben realizarse correctamente las prácticas agrícolas, desde el manejo del cultivo, la cosecha y la elaboración, hasta el almacenamiento (FAO, 2014b).

1.1.1. Nivel mundial y de la Unión Europea

El arroz es uno de los cereales más cultivados y populares del mundo con más de 160 millones de hectáreas cultivadas (FAOSTAT, 2017a). Entre 1961 y 2014 la superficie ha aumentado un 41%, pasando de 115.365.135 ha en 1961 a 162.716.862 ha en 2014. Durante el mismo periodo la producción ha aumentado un 243'8%, de 215.646.633 t a 741.477.711 t. Y el rendimiento también ha aumentado, en un 143'8%, creciendo de 1'87 t/ha a 4'56 t/ha (Figura 1). En el año 2017 se prevé una producción mundial de 758'8 millones de toneladas (FAO, 2017).

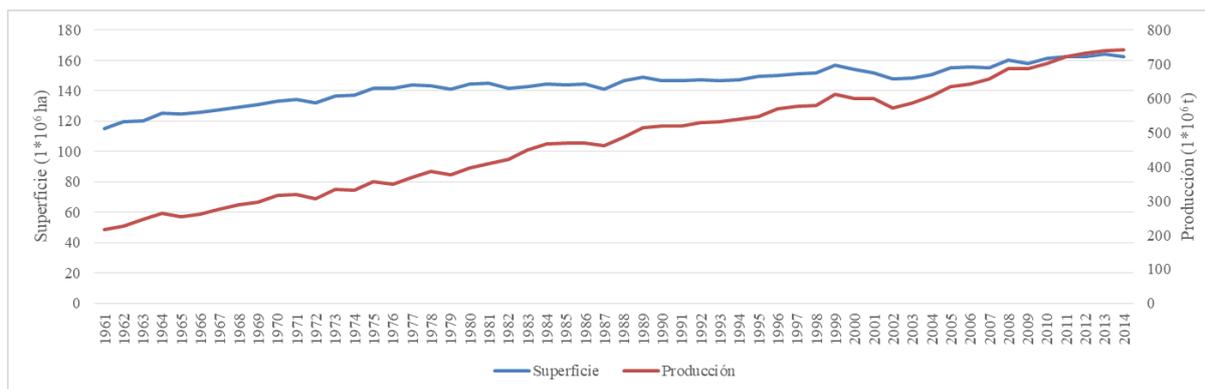


Figura 1. Producción y superficie mundial destinada al cultivo de arroz (elaboración propia, a partir de datos de (FAOSTAT, 2017a)).

En la Unión Europea desde 1961 hasta 2014 la superficie destinada a este cultivo ha aumentado un 34'6%, pasando de 321.228 ha a 432.236 ha aunque del año 2010 al 2014 la superficie ha disminuido en 48.000 ha. La producción ha crecido un 125'4%, de 1.591.293 t en 1961 a 3.586.949 t en 2014 y el rendimiento ha aumentado un 67'5%, pasando de 4'95 t/ha a 8'3 t/ha durante el mismo periodo (Figura 2).

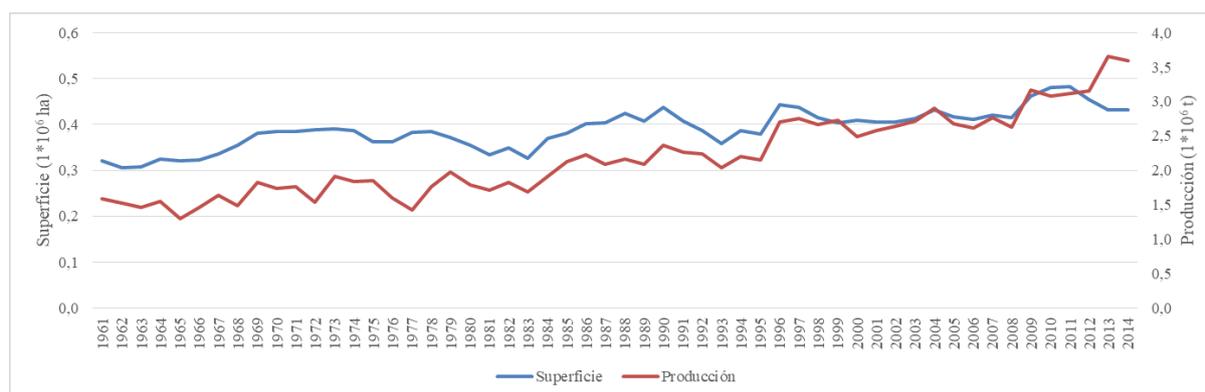


Figura 2. Producción y superficie de la Unión Europea destinada al cultivo de arroz (elaboración propia, a partir de datos de (FAOSTAT, 2017a)).

En los últimos 50 años la demanda mundial de arroz ha aumentado debido al crecimiento demográfico, mientras que las tierras y el agua destinadas a este cultivo no han crecido en la misma proporción (FAO, 2004). Durante el siglo XX el consumo mundial de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la población (Diouf, 2007).

El arroz de regadío puede generar dos problemas medioambientales. Uno de ellos es la contaminación de las capas freáticas debido a la lixiviación de productos químicos provenientes de fitosanitarios hasta los acuíferos y el transporte de estos productos aguas abajo por escorrentía superficial y retornos de riego. El otro, es la emisión de GEI (Gases de Efecto Invernadero) en condiciones anaerobias del suelo, principalmente metano, y óxido nitroso con la utilización de fertilizantes nitrogenados (FAO, 2004). Sin embargo, en aquellos

casos que el contenido de nitratos del agua de riego es elevado, como en el Delta del Ebro, el arroz consume una porción muy significativa de los nitratos que se aportan con el riego, de manera que la masa de nitratos que llega al mar queda notoriamente reducida (Martínez Beltrán, 2016).

1.1.2. España

A nivel europeo, España es el segundo productor de arroz, detrás de Italia. En la última década España ha aumentado un 6'3% la superficie destinada a este cultivo, representando del total europeo un 19'3% en 1961 y un 25'5% en 2014 (FAOSTAT, 2017a).

La producción de arroz en España entre 1961 y 2014 ha aumentado un 118'8%, pasando de 393.500 t a 861.103 t, mientras que la superficie destinada a este cultivo durante el mismo periodo de tiempo creció un 78,4% (de 61.900 ha a 110.419 ha). Esto supone un aumento del rendimiento del 22'7%, puesto que en 1961 era de 6,4 t/ha y en 2014 de 7,8 t/ha (Figura 3).

A pesar que globalmente la producción de arroz en España tiende a aumentar, la superficie destinada al cultivo del arroz ha disminuido en los últimos seis años, pasando de unas 122.000 ha en 2010 a 109.000 ha en 2016, suponiendo una reducción del 10'6% en este periodo. De acuerdo con estas cifras, el rendimiento medio en este intervalo de tiempo ha aumentado un 1'7% (MAPAMA, 2016a).

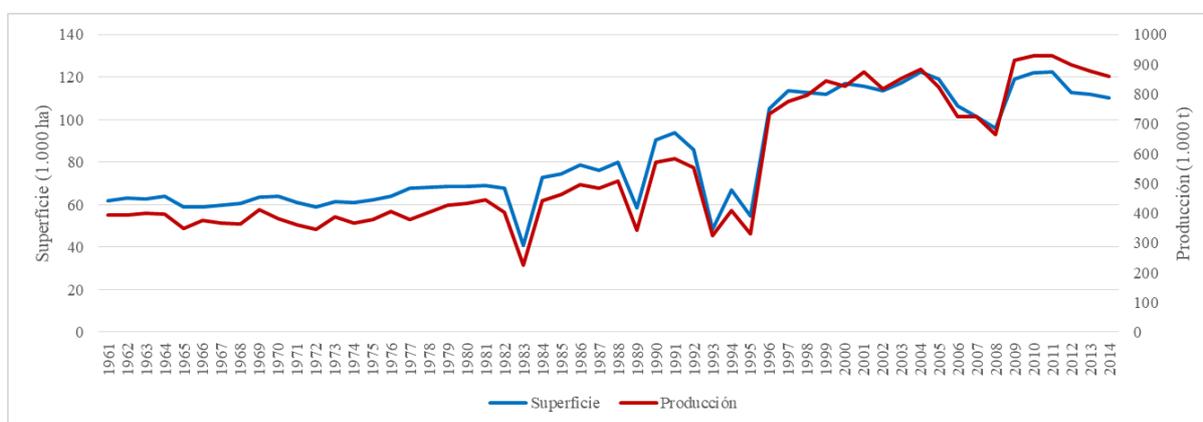


Figura 3. Evolución de la superficie destinada al cultivo de arroz y su producción en España de 2010 a 2016 (elaboración propia, a partir de datos de (FAOSTAT, 2017a)).

La producción española se concentra principalmente en el suroeste del país, y se identifican dos zonas: las áreas tradicionales, formadas por la Comunidad Valencia, Cataluña, Aragón y Murcia, y las nuevas áreas productoras, constituidas por las zonas de Andalucía y Extremadura (Langreo Navarro, 2007).

En el año 2016 Andalucía fue la comunidad autónoma con mayor producción, con unas 350 mil toneladas, que representa el 43% del total español. La superficie destinada fue de 40.191 ha, suponiendo el 36,7% de la superficie española con un rendimiento medio de 8,9 t/ha. La segunda comunidad productora es Extremadura, con una superficie destinada de 24.700 ha (22,6%), una producción de 175.000 t que suponen el 20,9% y un rendimiento medio de 7,1 t/ha. En la zona nordeste los grandes productores de arroz se encuentran en Cataluña y Valencia. Catalunya produjo 134.406 t y Valencia 116.836 t, suponiendo el 16% y 13,9% de la producción en España con unos rendimientos de 6,5 t/ha y 7,7 t/ha respectivamente (Figura 4).

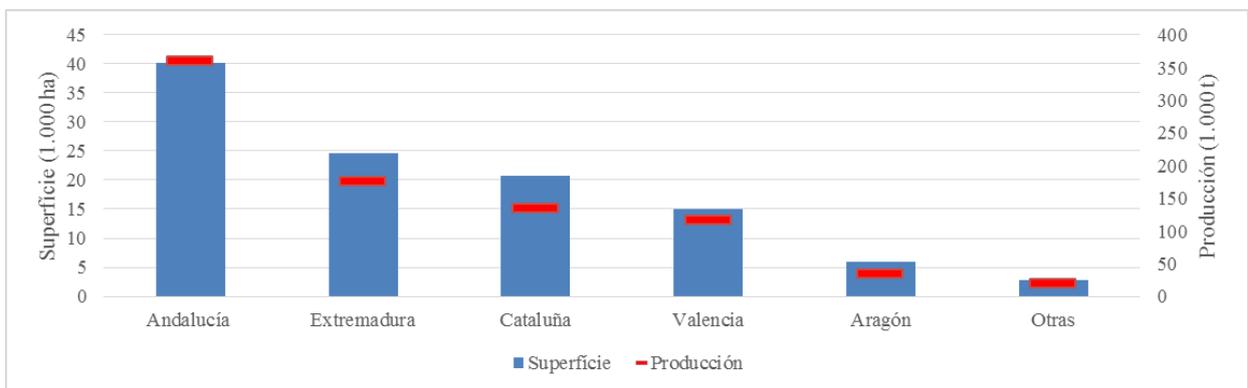


Figura 4. Distribución de la superficie de arroz y su producción en España por Comunidades Autónomas en 2016 – 2017 (elaboración propia, a partir de datos de (MAPAMA, 2016b).

En España hay tres zonas donde la producción de arroz tiene un valor añadido (Figura 5) por su consideración de Denominaciones de Origen Protegida (DOP): la DOP del Arròs del Delta de l'Ebre, la DOP del Arroz de Valencia y la DOP de Calasparra (Murcia, 2012).



Figura 5. Distribución de las Denominaciones de Origen Protegida de arroz en España (MAPAMA, 2014).

1.1.3. Catalunya

En la comunidad autónoma de Catalunya la producción de arroz no está repartida equitativamente entre las diferentes provincias. En Barcelona no se cultiva ninguna hectárea, y en 2014 el 95'6% de la producción de arroz se realizó en la provincia de Tarragona, principalmente en la zona del Delta del Ebro (Idescat, 2017a).

En Tarragona las producciones han disminuido un 0'7% desde 1999, suponiendo el 95'6% en 2014 con 126.052 t. La superficie cultivada ha decrecido un 0'76% en el mismo periodo, llegando al 95'32% del total de Catalunya en 2014 con 19.807 ha (Figura 6).

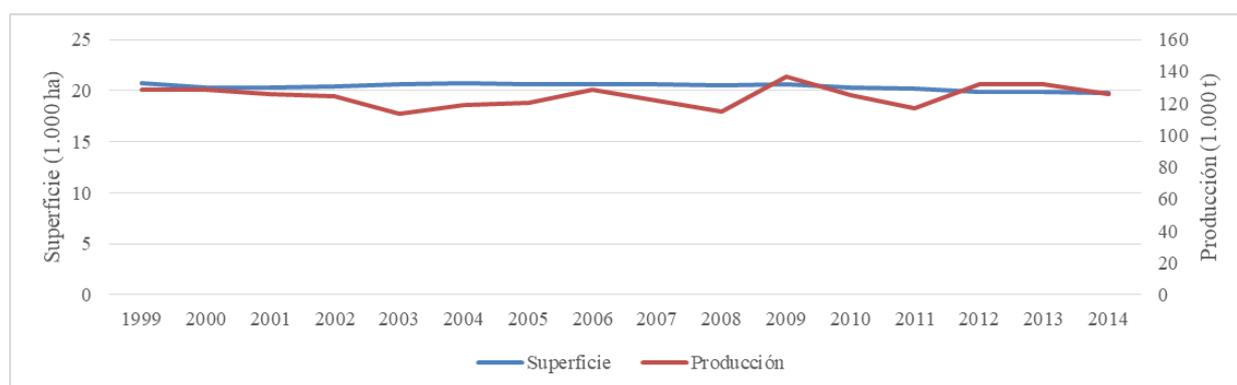


Figura 6. Evolución de la superficie destinada al cultivo del arroz y su producción en la provincia de Tarragona del 1999 al 2014 (elaboración propia, a partir de datos de (Idescat, 2017a) y (Idescat, 2017b)).

La producción en la provincia de Lleida respecto al total de Catalunya es prácticamente irrelevante puesto que su producción en 2014 supuso el 0'2% del total en 2014. Desde 1999 la superficie cultivada ha disminuido de 140 ha a 29 ha en 2014, pasando del 0'65% al 0'14% del total de la comunidad (Figura 7).

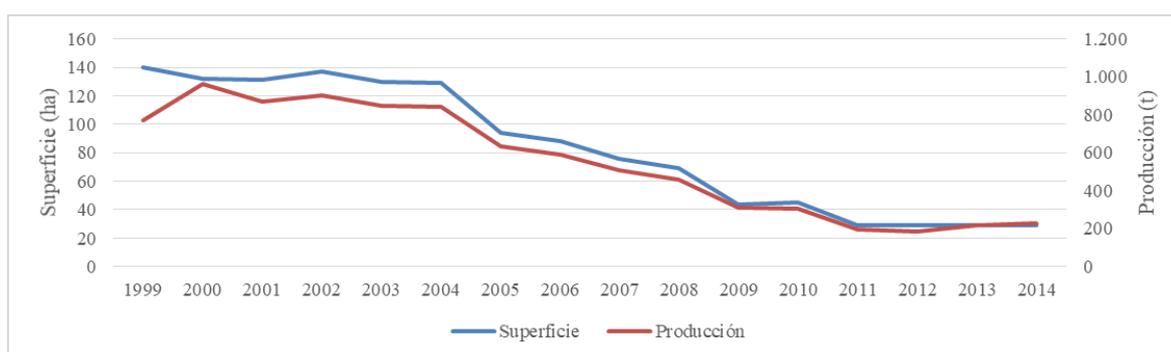


Figura 7. Evolución de la superficie destinada al cultivo del arroz y su producción en la provincia catalana de Lleida del 1999 al 2014 (elaboración propia, a partir de datos de (Idescat, 2017a) y (Idescat, 2017b)).

En la provincia de Girona las producciones han aumentado un 1'1% desde 1999, suponiendo el 4'3% en 2014 con 5.611 t. La superficie cultivada ha crecido un 1'27% en el mismo periodo, llegando al 4'54% del total de Catalunya en 2014 con 943 ha (Figura 8).

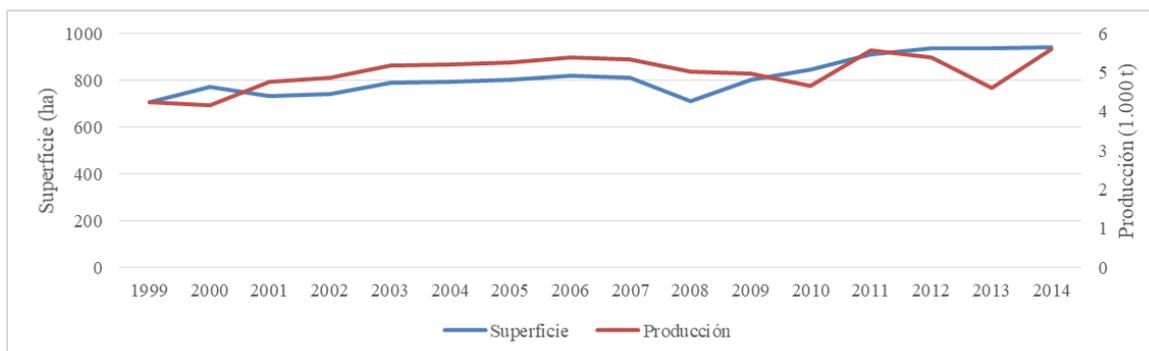


Figura 8. Evolución de la superficie destinada al cultivo del arroz y su producción en la provincia catalana de Girona del 1999 al 2014 (elaboración propia, a partir de datos de (Idescat, 2017a) y (Idescat, 2017b)).

1.1.4. Baix Empordà (Girona)

La comarca del Baix Empordà es donde se concentra la producción de arroz en la provincia de Girona, suponiendo el 87'81% de la provincia en 2016. Desde 2008 la superficie destinada a este cultivo en la comarca ha aumentado un 19'2%, llegando a 758 ha en 2016, y la producción un 8'4%, con 4.927 t en 2016 (Figura 9). El promedio de rendimiento durante este mismo periodo fue de 6 t/ha.

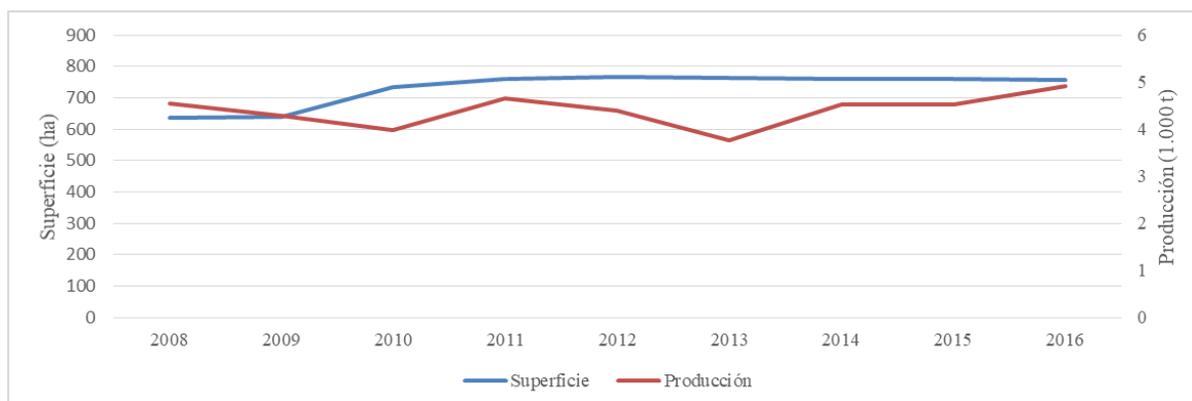


Figura 9. Evolución de la superficie destinada al cultivo del arroz y su producción en la comarca del Baix Empordà, provincia de Girona, del 2008 al 2016 (elaboración propia, a partir de datos de (Idescat, 2017a) y (Idescat, 2017b)).

1.2 Riego

1.2.1 El agua y la agricultura

Desde la aparición de la agricultura, con el establecimiento de las primeras civilizaciones, hasta el presente siglo XXI el ser humano ha dependido del agua para la producción de alimentos.

En la Tierra el agua sigue el ciclo hidrológico (Figura 10). Las altas temperaturas provocan los fenómenos de evaporación de las moléculas de agua, quedando contenidas en la atmósfera formando nubes hasta su precipitación en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve), y su posterior escorrentía superficial o filtración en las zonas no saturadas llegando a las capas

freáticas. Pero el ciclo del agua se ha visto alterado en los últimos años a causa de las intervenciones antropogénicas que han provocado la contaminación de la atmósfera, la disminución de los caudales de ríos, el descenso del nivel freático y la intrusión marina en acuíferos (López-Geta et al., 2001).



Figura 10. Diagrama sobre el ciclo hidrológico (Evans, 2017).

Hay que tener en cuenta que del total de agua del planeta (1.386 millones de km³) un 97% corresponde a agua salada y un 3% a agua dulce. Del agua dulce un 68'7% se encuentra formando capas de hielo y glaciares, por lo que la disponible para la agricultura queda limitada principalmente al 0'3% del agua dulce superficial (ríos, pantanos y lagos) y al 30'1% de agua subterránea que pueda extraerse (Gleick, 1996).

Cualquier proyecto agrícola está condicionado por la disponibilidad de agua que afectará su rentabilidad y productividad. Al ser un bien cada vez más escaso, aumenta la competencia entre los diferentes sectores y la agricultura se encuentra en desventaja frente a los mayores rendimientos obtenidos en los sectores industriales y de servicios, y la prioridad social del uso doméstico. En la mayoría de países la agricultura es el sector que demanda más agua. En Catalunya representa casi el 70% de los cuales el 88% proviene de agua superficial, y un 12% de subterráneas (ACA, 2010) (Figura 11).

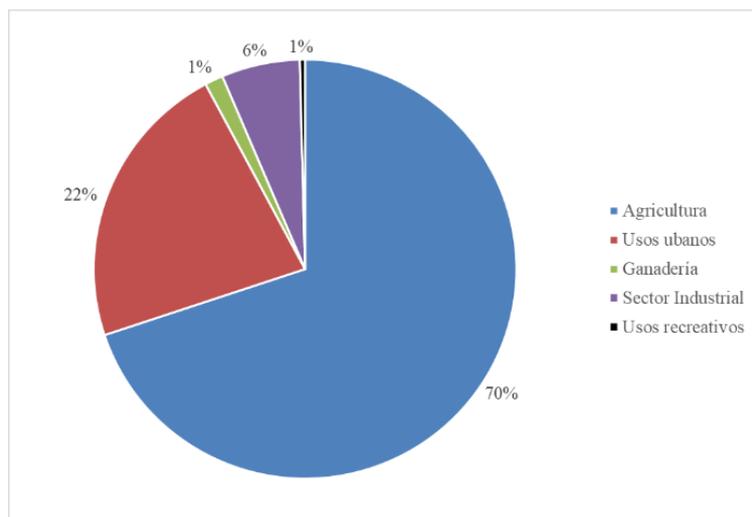


Figura 11. Distribución de los usos consuntivos hidrológicos en Catalunya (elaboración propia, a partir de datos de (ACA, 2010)).

1.2.2 Sistemas de riego

Un sistema de riego es la serie de componentes y estructuras que permiten que un área sea regada para abastecer las necesidades hídricas del cultivo. Se clasifican en tres tipos: por gravedad (entendiéndose aquel realizado por superficie), aspersión y localizado. El riego por aspersión es automotriz cuando se utilizan estructuras, como el pivot, que dan movilidad al aspersor. En España hay un total aproximado de 3.589.743 ha de regadío, de los cuales un 26'3% se riega por superficie, un 24% por aspersión y un 49'7% mediante riego localizado (MAPAMA, 2016c). Entre 2004 y 2016 en España el riego localizado ha aumentado un 54'57%, el automotriz un 20'14% y el de aspersión un 2'43%, mientras que el riego por gravedad ha disminuido un 23'32% (Figura 12). En Catalunya en 2016 un 49'81% de la superficie de regadío se regaba mediante gravedad, un 34'19% mediante riego localizado, un 11'28% por aspersión y un 4'72% por automotriz (MAPAMA, 2016d).

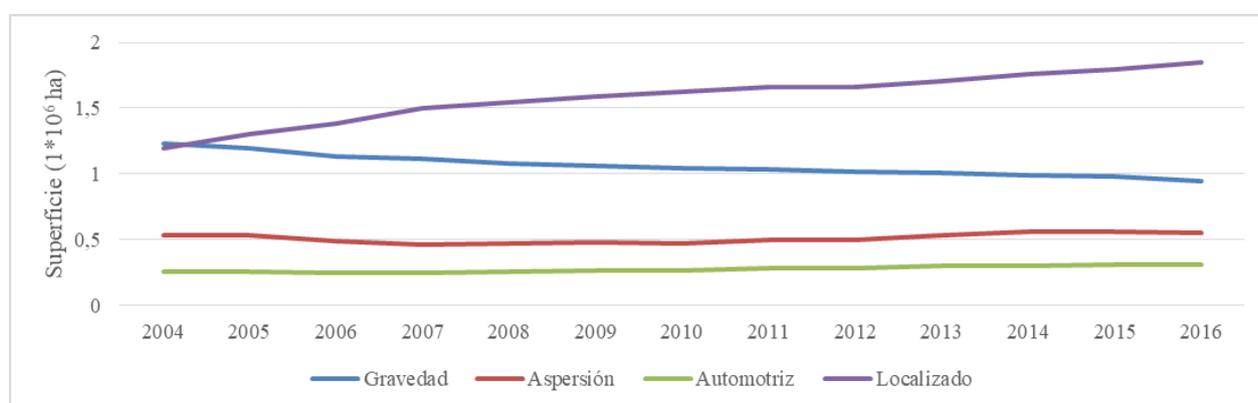


Figura 12. Gráfico sobre la evolución de los diferentes sistemas de riego en España durante el periodo 2004 – 2016 (elaboración propia, a partir de datos de (MAPAMA, 2016d)).

El manejo del agua es uno de los aspectos clave para alcanzar el potencial productivo del cultivo intentando minimizar el uso de agua. Por eso es conveniente analizar los diferentes sistemas en función de su eficiencia, coste (de instalación y mantenimiento) y consumo energético.

El riego por superficie no tiene consumo energético, el de aspersión de 0'23 kW h/m³ y el de gravedad de 0'18 kW h/m³. No hay que perder de vista que, hasta ahora, una mayor eficiencia hídrica ha ido ligada a una mayor ineficiencia energética. Desde 1950 se ha reducido un 21% el agua usada pero ha aumentado en un 1.800% la energía empleada (Corominas, 2010).

1.2.3 Riego en arroz

El arroz es el único cereal que sobrevive en sumersión en agua gracias a las estrategias de supervivencia que ha desarrollado a lo largo de miles de años. El propósito principal del agua en la mayoría de cultivos es poder realizar la evapotranspiración, con fines productivos. En el caso del arroz, que tradicionalmente se ha cultivado mediante técnicas de inundación, también necesita agua para mantener la lámina de inundación, compensando las pérdidas a causa de la infiltración y percolación. Por otra parte, la preparación del terreno mediante el fangueo también exige la aportación de agua. En la Tabla 1 se muestran las distintas fracciones del agua utilizada en el cultivo de arroz según FAO (2014c).

Tabla 1. Necesidades de agua diarias del cultivo de arroz en función de su propósito (FAO, 2014c).

Propósito del uso del agua	Uso consuntivo* (mm/día)	
	Bajo	Alto
Preparación del terreno (fangueo)	150	250
Evapotranspiración	500	1200
Mantener lámina de agua (perdidas por infiltración y percolación)	200	700
Total	850	2150

* Una vez usada el agua no se devuelve al medio donde se captó o de la misma forma en que se extrajo.

Frente a la técnica por inundación tradicional en el cultivo del arroz se están experimentando otros sistemas de riego para el ahorro de agua, como el riego por inundación intermitente (siglas en inglés AWD, Alternate Wetting Drying), el riego por aspersión y el riego por goteo. Las técnicas intermitentes o en seco ahorran más agua que las tradicionales pero requieren un mayor control de las malas hierbas.

Hay que vigilar el contenido volumétrico del suelo para una buena gestión del riego, evitando déficits de agua que puedan afectar negativamente al crecimiento y rendimiento (FAO,

2014c). Los principales síntomas que aparecen por causa de déficit hídrico en el cultivo del arroz son (Bouman y Tuong, 2001):

- Inhibición de la producción de hojas.
- Cerramiento de los estomas, que conlleva una reducción de la transpiración y la fotosíntesis.
- Enrollamiento de las hojas.
- Envejecimiento de las hojas.
- Cambios en la distribución de los asimilados.
- Reducción del peso de la planta.
- Retraso de la floración.
- Disminución de la brotación.
- Reducción del número de panículas.
- Incremento de la esterilidad de la espiga.
- Disminución del peso del grano.

Actualmente, los tres mayores retos en el riego del arroz son: ahorrar agua, incrementar la productividad del agua y aumentar las producciones con menos agua (Bouman y Tuong, 2001).

1.2.3.1 Riego por inundación

El riego por inundación es la técnica de riego tradicional y predominante en el cultivo del arroz. Su principal ventaja es el bajo coste de la instalación y funcionamiento del sistema cuando se practica en condiciones de agua abundante y a bajo precio. Si bien la baja eficiencia de aplicación es una cuestión ampliamente criticada a este sistema de riego, hay que considerar que el cultivo de arroz en la mayoría de áreas de España tiene lugar en condiciones de suelos salinos o con riesgo de salinización, por este motivo el agua que excede a las necesidades de riego tiene una función de lavado de sales. Además, la recarga de los acuíferos en zonas costeras actúa positivamente contra la intrusión salina.

Las técnicas tradicionales de inundación permanente permiten controlar mejor las malas hierbas y en algunas zonas montañosas han ayudado a prevenir la erosión del suelo, deslizamientos de tierra y a controlar las inundaciones en épocas de lluvias intensas (FAO, 2014c). Aparte de promover la percolación y la recarga de las capas freáticas, tiende a la neutralidad del pH del suelo, que incrementa la solubilidad y disponibilidad de los principales nutrientes (N y P), y amortigua los cambios de temperatura (Portero, 2011).

La parte negativa es que usa grandes volúmenes de agua, aumenta el riesgo de contaminación del freático a través de la lixiviación de productos químicos y emite mayores cantidades de metano debido a las condiciones anaerobias a que se somete el suelo durante la fase de cultivo (FAO, 2014c).

Aparte, durante estos últimos años se ha determinado que el arroz es uno de los alimentos de más absorción y contenido de arsénico, en especial la forma inorgánica que es considerada más tóxica (FDA, 2018). Se estima que el 90% del arsénico que presenta el arroz es inorgánico. Su ingesta tiene efectos sobre la salud a largo plazo, considerándose cancerígeno. Por eso surge la necesidad de cuantificarlo y regular los niveles de ingesta, especialmente durante la infancia (Hojsak et al., 2015). En este sentido China ha fijado un máximo nivel de contaminantes (MCLs) de 150 μg As por cada kilogramo de arroz (Zhu et al., 2008). En la Unión Europea el límite de cadmio por kg de arroz es de 0'2 mg/kg (reglamento CE n° 1881/2006), el de arsénico inorgánico de 0'2 mg/kg para el arroz elaborado y de 0'1 mg/kg en alimentos para lactantes y niños (reglamento (UE) 2015/1006).

La eficiencia global de los regadíos por gravedad debe contemplar los componentes de transporte y distribución por la red de riego y eficiencia de la parcela. Esta última depende del tipo de suelo y desnivel, tipo de riego por superficie (tablas, surcos, inundación) pero también del manejo del riego (caudal, tiempo de corte, habilidad del regante). Es común establecer valores de la eficiencia de campo bajos, alrededor del 50%, sin embargo Arbat et al. (2011) determinaron una eficiencia del 82% en parcela comercial de planta ornamental y suelo aluvial.

Soman (2012) determinó que las necesidades de riego totales para el arroz regado por inundación en el sur asiático eran de 1.300 – 1.600 mm, pero, en la práctica, los regantes superaron los 2.000 mm de agua de riego, con productividades normalmente inferiores a los 0'15 kg/m³ de agua.

Las dotaciones de riego en arroz oscilan entre 1'5 – 3'4 l/s/ha en el sur de España. En una campaña los volúmenes de agua que se usan por hectárea son entre 20.000 – 45.000 m³. El consumo se considera de 11.000 – 12.000 m³/ha, estimando una evapotranspiración media de 760 mm (Portero, 2011).

Des del punto de vista medioambiental, los impactos negativos que presenta el riego por inundación son la contaminación atmosférica, mediante la volatilización del amonio y la

liberación de gases de efecto invernadero, y la contaminación del agua principalmente por nitratos (Bouman et al., 2007).

1.2.3.1.1 Volatilización de amonio

El amonio que se volatiliza durante el cultivo de arroz proviene principalmente de la urea empleada como fertilizante. La cantidad volatilizada variará en función del clima, el contenido de agua en el suelo y el método de aplicación del fertilizante (Bouman et al., 2007). Buresh y De Datta (1990) estimaron que en zonas tropicales la pérdida de N era del 50% o superior. El cultivo de arroz de tierras bajas tiene unas emisiones de nitrógeno amoniacal de 3'6 Tg al año, considerándose el 45 – 50% del total que emite la agricultura (Kirk, 2004). Esto conlleva un gran impacto ambiental, puesto que se deposita en la superficie terrestre con la lluvia y acidifica el suelo.

1.2.3.1.2 Gases de efecto invernadero

El cultivo de arroz por inundación emite una gran cantidad de dióxido de carbono atmosférico, bastante metano y una pequeña cantidad de óxido nitroso.

A nivel mundial en 2016 se emitieron 511 Tg de CO₂ equivalente, suponiendo un incremento del 39'77% respecto el 1961 (Figura 13). En España las emisiones fueron de 1'17 Tg en 2016, y durante el mismo periodo el aumento fue de un 78'63% (FAOSTAT, 2017b).

Desde 1961 las emisiones mundiales de metano han incrementado un 49'73%, siendo en 2016 de 280 Gg (Figura 14). En España el incremento durante el mismo periodo fue de 78'84%, con unas emisiones en 2016 de 55,75 Gg de CH₄ (FAOSTAT, 2017b).

No se han realizado experimentos precisos para calcular las emisiones de óxido nitroso, pero se estima que estas disminuyen con un buen control del agua y no aplicando grandes cantidades de fertilizante nitrogenado (Bouman et al., 2007).

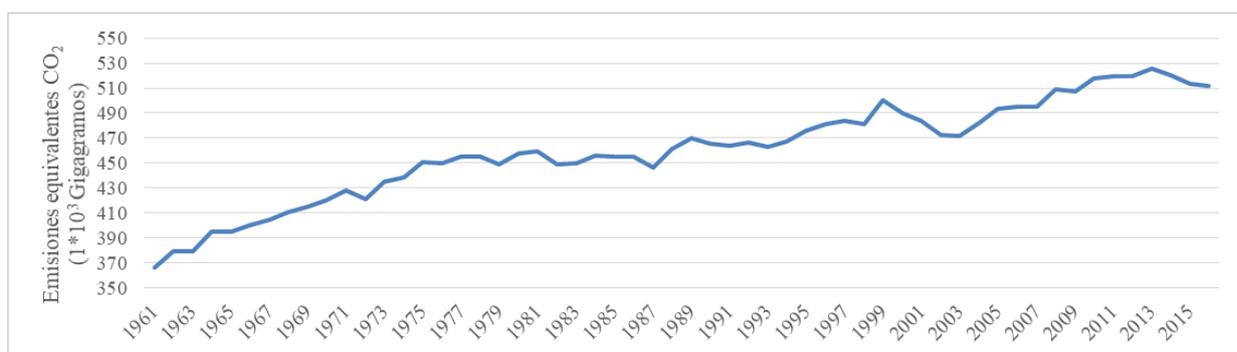


Figura 13. Emisiones mundiales equivalentes de dióxido de carbono por el cultivo de arroz durante el periodo de 1961 a 2016 (elaboración propia, a partir de datos de (FAOSTAT, 2017b)).

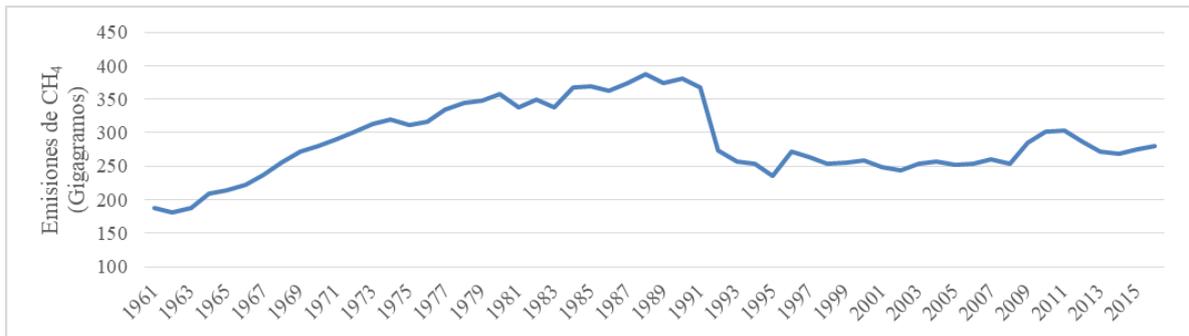


Figura 14. Emisiones mundiales de metano por el cultivo de arroz durante el periodo de 1961 a 2016 (elaboración propia, a partir de datos de (FAOSTAT, 2017b)).

1.2.3.1.3 Contaminación del agua

Los cambios en la calidad del agua pueden ser tanto positivos como negativos, variará en función de las prácticas agrícolas (uso de fertilizantes y biocidas) y la gestión del agua (Bouman et al., 2007). La calidad del agua puede mejorar, ya que el arroz tiene la capacidad retirar nitrógeno y fosforo (Feng et al, 2004; Ikeda y Watanabe, 2002). Pero también puede empeorarla, como muestra un estudio realizado en China por Cui et al. (2000) donde la contaminación por nitrógeno a causa de una excesiva fertilización es elevada. La contaminación de los acuíferos se origina por la lixiviación de los nitratos, los biocidas y los residuos de los mismos (Bouman et al., 2002). Pero Buresh y De Datta (1990) estiman que la lixiviación de nitrógeno en riego por inundación es despreciable a causa de la rápida desnitrificación.

1.2.3.2 Riego por inundación intermitente

El sistema consiste en la alternancia de periodos de inundación y de secado. Permite reducir hasta un 30% el agua consumida, ahorrar costes de riego y bombeo, y reducir las emisiones de metano hasta un 48% sin disminuir la producción (Richards y Sander, 2014).

Bouman y Tuong (2001) analizaron los resultados de 31 experimentos realizados en campo y determinaron que en el 92% de los casos el riego por inundación intermitente tiene unas reducciones de rendimiento de entre el 0% y el 70% comparado con el riego por inundación. La gran variedad de estos resultados viene determinada por el plazo entre riegos y las condiciones del suelo. En cambio, en todos los casos la productividad del agua total aumenta. Sin embargo, Lampayan et al. (2005) llegaron a la conclusión en un estudio realizado en Filipinas que los rendimientos obtenidos eran los mismos que en riego por inundación pero ahorrando un 16 – 24% en los costes de agua y un 20 – 25% en los costos de producción.

Un estudio reciente realizado por Pascual y Wang (2017) obtuvo unos resultados bastante diferentes regando cada tres y siete días, frente al sistema tradicional de inundación permanente. La productividad del agua de riego y total aumentaron en ambos casos, entre un 60 – 250%. El Índice de Área Foliar (LAI, siglas en inglés Leaf Area Index) de media fue un 19% superior en el riego cada tres días, y del 9% en el de cada siete. Aunque los volúmenes radiculares aumentaron de media un 20% respecto al riego tradicional, el peso de 1.000 granos disminuyó un 14%, y los rendimientos un 6% en una variedad, y en la otra hasta un 20%.

La diferencia de resultados obtenidos en cada variedad pone de manifiesto la relevada importancia de selección e investigación de nuevas variedades adaptadas a este sistema de riego para obtener mayores rendimientos.

Aunque no hay muchos estudios referentes a la evaporación, la infiltración y la percolación, Belder et al. (2007) y Cabangon et al. (2004) determinaron que la evaporación disminuye un 2 – 33% respecto al riego por inundación.

Las principales ventajas del riego intermitente son la mejora del sistema radicular y el mayor control de algunas plagas y enfermedades al alternar periodos aeróbicos (Bouman et al., 2007).

Existe una variante denominada SRI (System of Rice Intensification), caracterizada por las siguientes prácticas (Uphoof, 2007):

- Trasplantar las semillas cuando tengan entre 8 y 12 días.
- Sembrar con marcos cuadrados mínimos de 25 x 25 cm.
- Controlar las malas hierbas con una azada rotativa para airear el suelo.

Las ventajas del sistema SRI generan debate y controversia, por eso se recomienda emplear el sistema intermitente con las prácticas que hayan obtenido mejores resultados en la zona específica (Bouman et al., 2007).

1.2.3.3 Riego por aspersión

El riego por aspersión en arroz es un sistema actualmente empleado principalmente en campos experimentales, por lo que hay escasa información. Benavides y Jara (2014) en Zamorano (Honduras) obtuvieron rendimientos de 5'13 t/ha, con una densidad de siembra de 136 kg/ha y una productividad en el uso del agua de 0'32 kg de arroz/m³. Otro estudio realizado en Zaragoza concluyó que mediante aplicaciones de riego inferiores a 500 mm el

arroz no producía grano. Se obtuvieron rendimientos cercanos a 6 t/ha con niveles de 700 – 900 mm, suponiendo una reducción del 30 – 100% respecto al agua utilizada en sistemas de inundación en la misma zona. La productividad del agua fue de 0'5 kg de arroz/m³ (Blanco, 2014).

1.2.3.4 Riego por goteo

Este sistema de riego durante las últimas dos décadas ha sido probado experimentalmente e implementado en algunas zonas. Permite reducir las pérdidas de agua por percolación e infiltración, disminuir la evaporación y eliminar la gran cantidad de agua utilizada para preparar el suelo (Bouman et al., 2007).

Ramulu et al. (2016) obtuvieron en la India mediante riego por goteo productividades del agua entre 0'35 a 0'49 kg de arroz/m³ en suelos franco arenosos. Mediante una función cuadrática predijeron que la máxima producción, de 3.800 kg/ha, se obtendría con una fertilización de 140 kg N/ha utilizado 920 mm.

Para obtener altos rendimientos en este sistema hay que disponer de nuevas variedades que combinen la tolerancia característica de las variedades de tierras altas y las altas producciones alcanzadas por las variedades de las tierras bajas (Laffite et al.; 2002; Altin et al.; 2006).

El desarrollo de variedades de clima templado se inició a mediados de los años ochenta en Brasil y el norte de China (Bouman et al., 2007). Yan Xiaoguang et al. (2005) y Bouman et al. (2006) obtuvieron por goteo en Beijing unos rendimientos de 2'5 – 5'7 t/ha con únicamente unos inputs de agua de 500 – 900 mm, mientras que mediante riego por inundación los rendimientos fueron de 5'4 – 6'8 t/ha con 1.300 mm totales de agua. Xue et al. (2007) determinaron un rendimiento de 6 t/ha con un input de agua de 705 mm. En cambio en Kaifeng, Feng et al. (2007) obtuvieron rendimientos de 2'4 – 3'6 t/ha utilizando 750 – 1.000 mm de agua total. En la misma zona Bouman et al. (2007) determinaron que los agricultores obtenían rendimientos de 5'5 t/ha con inputs totales de agua de 566 mm.

El origen de variedades de clima tropical es más reciente (Bouman et al., 2007). Datta et al. (1973) obtuvieron la variedad IR20 en el IRRI (International Rice Research Institute) de Filipinas, que permitía un ahorro del 55% en agua comparado con el riego por inundación, pero el rendimiento disminuye de 8 t/ha a 3'4 t/ha. Bouman et al. (2005) y Peng et al. (2006), utilizando la variedad Apo, concluyeron que de media el rendimiento mediante riego por goteo disminuye un 32% respecto al riego por inundación durante la época húmeda, y un 22% en la seca. Los rendimientos del arroz aeróbico fueron de 4 – 5'7 t/ha en la época húmeda y

de 3'5 – 4'2 t/ha en la seca. Pero el riego por goteo en comparación con el riego por inundación redujo 190 mm el agua destinada a la preparación del suelo, 250 – 300 mm las pérdidas por percolación e infiltración, 80 mm la evaporación y 25 mm la transpiración.

Algunas de las ventajas del sistema de riego por goteo frente al de inundación son la reducción de los gases GEI, la disminución de la contaminación por nitratos (Soman, 2012) y la inferior concentración de arsénico en el arroz (Arao et al.; 2009, Talukder et al.; 2011, Li et al.; 2009).

1.3 Fisiología del arroz

El estudio de la fisiología del arroz es de relevada importancia, favoreciendo la monitorización del cultivo. Esto permite predecir los diferentes estadios de crecimientos y estimar las necesidades hídricas, el momento óptimo de recolección y aplicación de fertilizantes.

1.3.1 GDD (Growing Degree Days)

Para un día determinado el GDD es la mediana de temperatura máxima y mínima del aire, pero estos valores tienen un rango para cada cultivo (Payero et al., 2017). La acumulación de GDD es un cálculo que permite estimar el nivel de crecimiento que tiene una planta a partir del sumatorio diario durante un periodo de tiempo (Miller et al., 2001). Se calcula mediante la ecuación (Akaogi, 2014):

$$GDD = \left[\frac{(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})}{2} \right] - 50$$

Considerando:

- $T_{m\acute{a}x}$, es la temperatura máxima diaria (°F).
- $T_{m\acute{i}n}$, es la temperatura mínima diaria (°F).

1.3.1.1 Degree – Day 50 (DD50)

El DD50 es el programa informático de monitorización actualmente más utilizado en el cultivo de arroz. Es una modificación del GDD desarrollado en los años setenta en Arkansas para facilitar la determinación del periodo de elongación internodal que indicaba el momento para realizar la fertilización de nitrógeno (Hardke et al., 2013). Establece como temperatura base para el cultivo de arroz los 10°C. Este programa necesita constantes actualizaciones con la aparición de nuevas variedades y adaptación a cada zona climática (Branson et al., 2007).

1.3.2 Morfología

La morfología del arroz (*Oryza sativa L.*) es importante para la diferenciación de variedades y los estudios de fisiología y de mejoramiento (CIAT, 2005). Sus órganos se clasifican en vegetativos y reproductivos.

1.3.2.1 Órganos vegetativos

1.3.2.1.1 Raíces

Las raíces se clasifican en seminales (o temporales) y adventicias (o permanente). Las primeras son poco ramificadas y mueren después de la germinación al ser remplazadas por las adventicias. Las segundas en los primeros estadios son poco ramificadas y relativamente gruesas pero, conforme avanza el crecimiento y maduran, se alargan (CIAT, 2005) dando lugar a raíces fibrosas muy ramificadas y con pelos radicales (Chang y Bardenas, 1965). Estas se subdividen en raíces de corona y de nudos, todas se desarrollan a partir de nudos pero las de corona crecen bajo la superficie del suelo y se clasifican en raíces superficiales laterales (ageotrópicas) y raíces comunes (Olmos, 2006). Normalmente de cada nudo se desarrollan unas 5 – 25 raíces (Yoshida, 1981).

Las puntas de las raíces para facilitar su penetración en el suelo están protegidas por una masa de células denominada coleoriza. La forma y crecimiento de las raíces son parámetros varietales. En suelos bien aireados se mantienen de color blanco, pero adquieren tonalidades rojizas debido a compuestos férricos en suelos oxidados y negras por compuestos sulfurosos altos (Degiovanni et al., 2010).

1.3.2.1.2 Tallos

Un tallo está formado por la serie alterna de nudos y entrenudos (Chang y Bardenas, 1965). La altura de la planta depende del número de entrenudos y de su longitud, que generalmente vienen determinados genéticamente. El septo es la parte interna del nudo que separa dos entrenudos adyacentes. De cada nudo se forma una hoja y dispone de una yema que puede desarrollar una macolla o hijo. El conjunto de macollas y el tallo principal forman la planta (CIAT, 2005).

Las macollas primarias crecen a partir del primer, segundo y sucesivos nudos del tallo principal, los hijos secundarios nacen del segundo nudo de la macolla primaria y los hijos terciarios del segundo nudo de cada macolla secundaria (Degiovanni et al., 2010).

1.3.2.1.3 Hojas

Las hojas se distribuyen de forma alterna a lo largo del tallo. La primera de la base se denomina prófalo, no tiene lámina y está constituida por dos brácteas aquilladas y la última, situada debajo la panícula, hoja bandera, que se caracteriza por ser más corta y ancha. Cada hoja completa está formada por la vaina, el cuello y la lámina. En el cuello hay una lígula, que es una estructura membranosa triangular, y las aurículas, que son dos apéndices con pequeños dientes en la parte convexa (CIAT, 2005).

El número de hojas del tallo principal varía en función de la variedad pero generalmente es entre 9 y 23. Durante la época de floración las dos hojas superiores son las responsables de la fotosíntesis de un 75% de los carbohidratos que van al grano (Degiovanni et al., 2010).

1.3.2.2 Órganos reproductivos

1.3.2.2.1 Flor

Las flores se agrupan en inflorescencias denominadas panículas. Estas se sitúan sobre el nudo apical del tallo, denominado nudo ciliar, donde no se desarrolla ni hoja ni macollo. En función de la distancia de la panícula respecto al cuello de la hoja bandera, su emergencia se clasifica en: completa, semicompleta, normal, parcial o nula. Y, en función del ángulo que formen las ramificaciones, se clasifican como abiertas, cerradas o intermedias. La panícula se mantiene erecta durante la floración y luego se dobla debido al peso de los granos maduros (Degiovanni et al., 2010).

Del eje principal o raquis nacen las ramificaciones, que a su vez dan lugar a ramificaciones secundarias de donde brotan las espiguillas a partir del pedicelo. Cada espiguilla está formada por dos glumas estériles (lemma y palea), la raquilla y la flor. Cada flor consta de seis estambres alargados con anteras bífidas y un pistilo formado por un ovario simple, un estilo corto y un estigma plumoso (CIAT, 2005). La apertura floral viene determinada por la turgencia de dos protuberancias denominadas lodículas que separan la lemma y la palea (Degiovanni et al., 2010).

1.3.2.2.2 Semilla

El grano de arroz es un ovario maduro, seco e indehisciente. La cáscara está formada por la lemma y la palea, y una vez descascarado, el grano es una carióspside que conserva el pericarpio y se denomina arroz integral. El pericarpio se constituye por tres capas de células fibrosas duras: endocarpio, mesocarpio y exocarpio. En su parte interior hay dos capas proteicas conocidas como tegumento y aleurona que envuelven el endospermo y el embrión

(Degiovanni et al., 2010). El embrión está constituido por la plúmula (cubierta por el coleóptilo) y la radícula o raíz primaria (envuelta por la coleorriza). Se sitúa en la parte ventral y se separa del endospermo a partir del escutelo (Areola, 2014).

En función de su longitud los granos se pueden clasificar (CIAT, 2005):

- Extralargo (EL): 7'6 mm o más.
- Largo (L): 7'5 – 6'6 mm.
- Medio (M): 6'5 – 5'6 mm.
- Corto (C): 5'5 mm o menos.

1.3.3 Fenología

El conocimiento del desarrollo fenológico de la planta de arroz y la acumulación de los grados día permite mejorar el manejo del cultivo (Velázquez et al., 2015). Counce et al. (2000) clasifica su desarrollo en tres etapas: la de plántula (S), la vegetativa (V) y la reproductiva (R).

1.3.3.1 Etapa de plántula

La etapa de plántula se denomina S (Figura 15) y va desde la siembra hasta la aparición de la primera hoja verdadera. Se divide en cuatro estadios que van de S0 a S3 (Velázquez et al., 2015). La germinación tiene lugar cuando durante dos días las temperaturas son de 21 – 36°C, si son inferiores o superiores requerirá más tiempo (Moldenhauer et al., 2013). Este proceso generalmente empieza con la emergencia de la radícula en condiciones secas, mientras que en condiciones de inundación el coleóptilo emerge primero. A continuación el prófalo emerge del coleóptilo, y en condiciones anaeróbicas esto puede ocurrir anteriormente a la emergencia de la radícula (Counce et al., 2000).

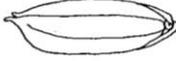
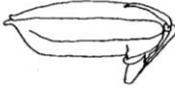
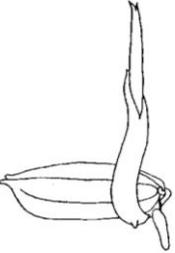
Growth Stage	S0	S1	S2	S3
Morphological Criteria	Dry, unimbibed seed	Emergence of coleoptile	Emergence of radicle	Emergence of prophyll from coleoptile
Illustration				

Figura 15. Ilustración de los diferentes estadios de plántula (S) en el orden que ocurren en la mayoría de casos (Counce et al., 2000).

1.3.3.2 Etapa vegetativa

La etapa vegetativa se denomina V (Figura 16) y va desde la aparición de la primera hoja verdadera hasta la formación del cuello en la hoja bandera (número 13). Se divide en 13 estadios que van de V1 a V13 (Velázquez et al., 2015). Cada estadio hace referencia a un *phytomer*, que es la unidad de medida para indicar que cada hoja se ha desarrollado completamente (limbo y vaina) (Counce et al., 2000). La emergencia de una hoja se produce normalmente cada 3 – 7 días, al acumular 100 – 175 DD50 entre V1 y V4. Posteriormente la formación se produce más rápido, necesitando 75 – 150 DD50, hasta llegar a la fase de retardo donde puede llegar a requerir 200 DD50 (Moldenhauer et al., 2013). Cuando la planta está en V4 indica que tiene cuatro hojas completamente formadas y que se inicia el macollamiento, y en V9 se inicia la diferenciación del primordio al mismo tiempo que empieza la etapa reproductiva (Velázquez et al., 2015).

Growth Stage	V1	V2	V3	V4	V5
Morphological Marker	Collar formation on first complete leaf (Leaf 1) on main stem	Collar formation on Leaf 2 on main stem	Collar formation on Leaf 3 on main stem	Collar formation on Leaf 4 on main stem	Collar formation on Leaf 5 on main stem
Illustration					
Growth Stage	V6	V7	V8	V9 (V _{F,4})	
Morphological Marker	Collar formation on Leaf 6 on main stem	Collar formation on Leaf 7 on main stem	Collar formation on Leaf 8 on main stem	Collar formation on Leaf 9 on main stem	
Illustration					
Growth Stage	V10 (V _{F,3})	V11 (V _{F,2})	V12 (V _{F,1})	V13 (V _F)	
Morphological Marker	Collar formation on Leaf 10 on main stem	Collar formation on Leaf 11 on main stem	Collar formation on Leaf 12 on main stem	Collar formation on Leaf 13 (flag leaf) on main stem	
Illustration					

Figura 16. Ilustración de los diferentes estadios vegetativos (V) (Counce et al., 2000).

1.3.3.3 Etapa reproductiva

La etapa reproductiva se denomina R (Figura 17) y va desde la diferenciación de la panícula hasta alcanzar la madurez fisiológica. Se divide en 10 etapas que van de R0 a R9. Cuando la planta está en R4 se produce la floración, en R7 el grano está pastoso y en R9 alcanza la humedad necesaria para la cosecha (Velázquez et al., 2015). El paso de R0 a R1 requiere 200

DD50, 600 DD50 de R1 – R2, 6 días de R2 – R3, 37 DD50 de R3 – R4, 54 DD50 de R4 – R5, 90 DD50 de R6 – R7, 60 DD50 de R7 – R8 y 200 DD50 hasta R9 (Moldenhauer et al., 2013).

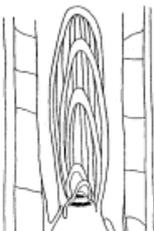
Growth Stage	R0	R1	R2	R3	R4
Morphological Marker	Panicle development has initiated	Panicle branches have formed	Flag leaf collar formation	Panicle exertion from boot, tip of panicle is above collar of flag leaf	One or more florets on the main stem panicle has reached anthesis
Illustration					
Growth Stage	R5	R6	R7	R8	R9
Morphological Marker	At least one caryopsis on the main stem panicle is elongating to the end of the hull	At least one caryopsis on the main stem panicle has elongated to the end of the hull	At least one grain on the main stem panicle has a yellow hull ¹	At least one grain on the main stem panicle has a brown hull ²	All grains which reached R6 have brown hulls
Illustration					

Figura 17. Ilustración de los diferentes estadios reproductivos (R) (Counce et al., 2000).

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es comparar el efecto de los sistemas de riego por inundación continua y por goteo en el cultivo del arroz.

Los objetivos específicos son:

1. Determinar para el riego por inundación y goteo:
 - a. Los volúmenes de agua utilizados.
 - b. La evolución de los contenidos volumétricos de agua del suelo.
 - c. La variación de la salinidad del suelo.
 - d. Las producciones obtenidas.
 - e. Los índices de eficiencia en el uso del agua.
2. Caracterizar el desarrollo del cultivo a través de:
 - a. El Índice de Área Foliar (LAI).
 - b. La fenología de la planta y su relación con los grados-día (GDD).
3. Evaluar el interés que presenta la instalación de una estación agroclimática a pie de parcela frente a la adquisición de datos climatológicos a partir de las estaciones más cercanas pertenecientes a la XEMA (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques), mediante la comparación de las variables:
 - a. Temperatura media, máxima y mínima.
 - b. Precipitación diaria y acumulada.
 - c. Evapotranspiración diaria y acumulada.
 - d. Grados día y acumulados.

Este trabajo se ha enmarcado en un proyecto piloto innovador que ha recibido una ayuda económica según la Orden ARP/258/2015, del 17 de agosto de la Generalitat de Catalunya y cuya finalidad principal es la creación de Grupos Operativos de la Asociación Europea para innovar tanto en productividad como en sostenibilidad agrícola. Asimismo demostrar en campo a los agricultores las nuevas técnicas de cultivo, con grandes superficies cultivadas en lugar de lo que es habitual en investigación, con parcelas de menor superficie y varias repeticiones. Esta ausencia de repeticiones ha limitado el tratamiento estadístico de los datos obtenidos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del ensayo

Los ensayos experimentales se realizaron durante el periodo de mayo a octubre de 2017, en dos campos comerciales de zona del Baix Ter (Figura 18), en Torroella de Montgrí y Fontanilles (Figura 19). Respectivamente se destinaron 1'15 ha al cultivo de arroz mediante riego por inundación continua (RIC) y 0'57 ha en riego por goteo superficial (RG).

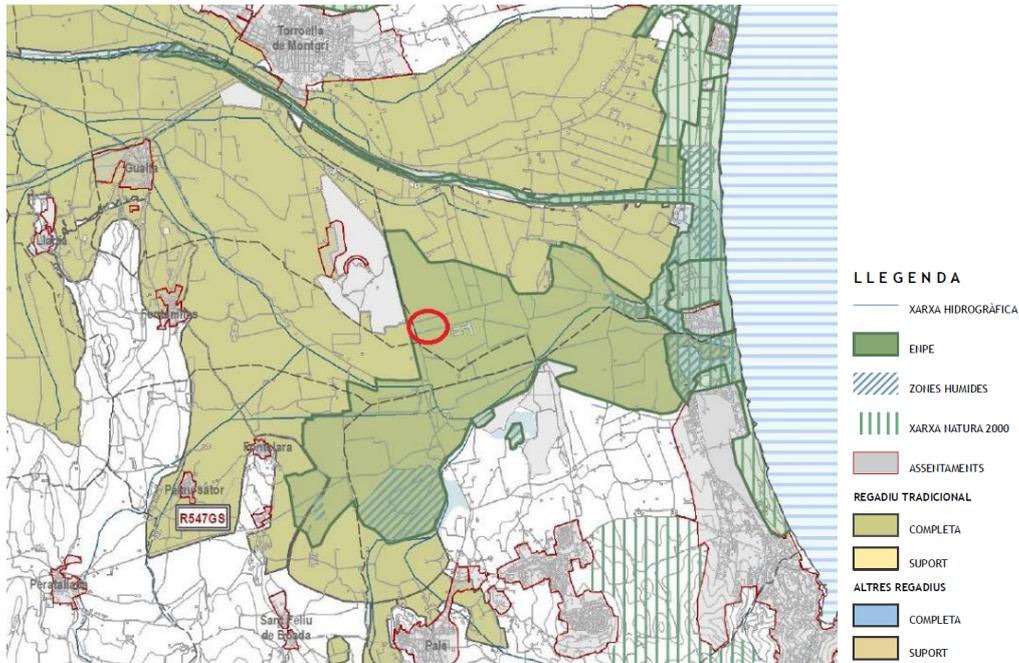


Figura 18. Mapa de la ubicación de las parcelas experimentales en la zona regable del Baix Ter (DARP, 2011).

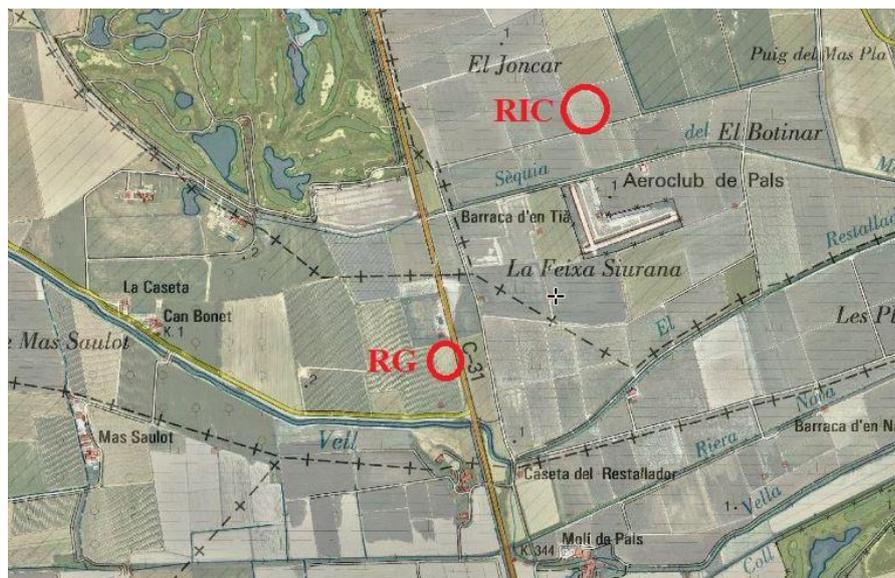


Figura 19. Ubicación de las parcelas experimentales en Torroella de Montgrí y Fontanilles. Leyenda: RIC (riego por inundación continuado), RG (riego por goteo) (FEGA, 2018).

3.2 Características del medio

3.2.1 Clima

El clima del área geográfica donde se han desarrollado los ensayos se caracteriza por ser mediterráneo litoral del norte (Meteocat, 2015). La pluviometría media anual se sitúa en unos 600 mm, siendo los meses de otoño los más lluviosos. Las temperaturas medias anuales son de 15'5°C, con una amplitud térmica de 14'2°C. Los meses más calurosos son julio y agosto (llegando a 35°C), y al tener muy baja pluviometría se definen como áridos. El mes más frío es enero, con una media de temperaturas mínimas de 4'8°C. El riesgo de heladas es de noviembre a marzo pero el termómetro no acostumbra a bajar de los 0°C (Meteocat, 2016).

En la Figura 20 se representa la media de la pluviometría y las temperaturas de los últimos diez años (2007 – 2017) en La Tallada d'Empordà para poder compararlas con las del año del cultivo (2017). El 2017 empezó con unas grandes lluvias en enero, y el resto de meses la pluviometría fue inferior a la media de los últimos diez años, exceptuando junio cuando ya estaba establecido el cultivo, que fue 2'7 veces superior en 2017. La precipitación media anual es de 594 mm, un 17'9% inferior a la del 2017, por lo que fue un año más húmedo que la media. Las temperaturas de 2017 se ajustaron bien a la media ($R^2 = 0'97$, metodología en apartado 3.7). El promedio anual de las temperaturas medias en 2017 fue de 15'1°C, un 1'67% inferiores a la de los últimos diez años.

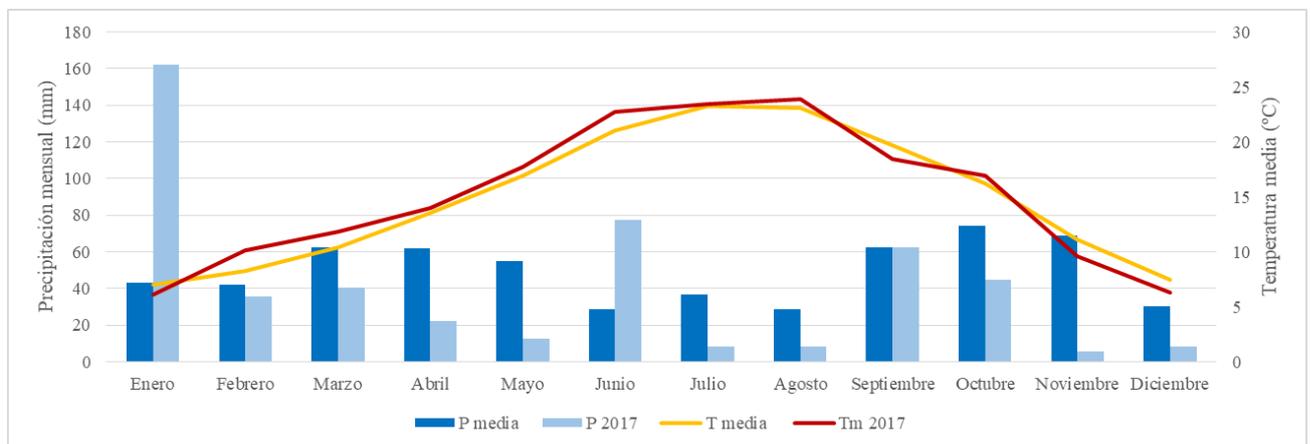


Figura 20. Precipitación mensual y temperatura media en La Tallada d'Empordà en 2017 y la media de 2007 – 2017.

En la Figura 21 se muestra la evapotranspiración de referencia (ET_o) media de los últimos diez años (2007 – 2017) para poder compararla con la del año del proyecto (2017). Se observa que, exceptuando setiembre, la evapotranspiración de 2017 fue igual o un poco superior a la media. La ET_o total en 2017 fue de 1.034 mm, un 6'76% superior a la media y un coeficiente

de correlación elevado entre ambos conjuntos de datos ($R^2 = 0,97$, metodología en apartado 3.7).

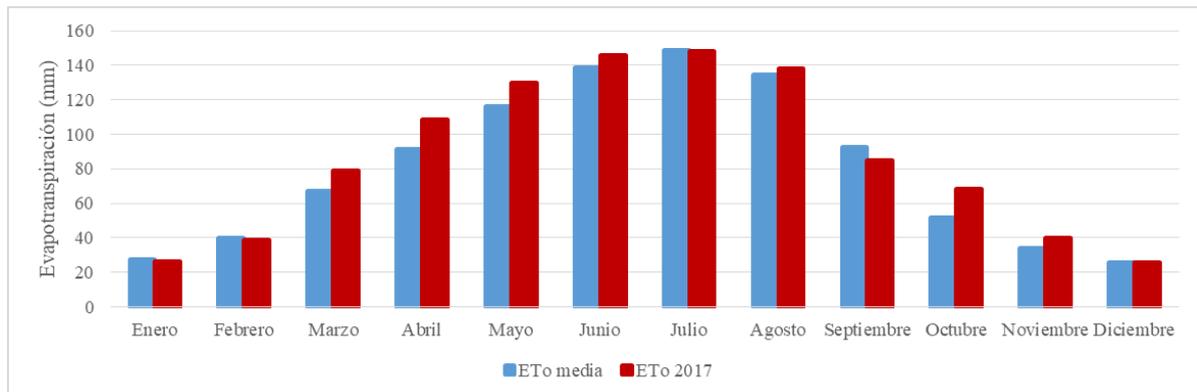


Figura 21. Evapotranspiración en La Tallada d'Empordà en 2017 y la media de 2007 – 2017.

3.2.2 Suelo

El suelo de la parcela RIC se caracterizó como Xerofluvent Aqüic (Margarit et al., 1993), sin presencia de elementos gruesos, con reducida capacidad de drenaje y profundidad de enraizamiento limitada por el nivel freático. La parcela RG pertenece al mismo subgrupo de suelos que la RIC.

El suelo de las dos parcelas experimentales se analizó en un Laboratorio Acreditado en julio y agosto de 2017 para determinar sus características físicas y químicas (Tabla 2). La densidad aparente se calculó mediante Saxton et al. (1986) y el contenido de agua a saturación se determinó en el laboratorio mediante el secado (estufa a 105°C) de muestras de suelo extraídas en campo cuando el potencial matricial era de 0 kPa. Ambos suelos son básicos, no salinos, con contenidos de materia orgánica altos en el primer horizonte disminuyendo en profundidad. El suelo RG es más pesado que el RIC, presentando un contenido de agua a capacidad de campo un 25% superior.

Tabla 2. Caracterización edáfica de las parcelas RIC y RG.

Parámetros	Unidades	RIC (Riego por inundación continuo)			RG (Riego por goteo)		
		0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm	0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm
pH (past. sat.)	pH	7,7	7,8	8,1	8	7,8	8,3
C.E. (ext. past. sat.)	dS/m	1,68	1,53	1,3	1,82	1,13	1,6
Materia orgánica oxidable	%	2,85	1,74	0,93	2,43	1,53	0,99
Arena	%	5	10,5	16,2	5,2	6,5	10,1
Limo	%	60,3	54,5	54,5	48,9	42,8	43,4
Argila	%	34,7	35	29,3	45,9	50,7	46,5
Densidad aparente	kg/m ³	1.216	1.225	1.287	1.177	1.165	1.184
Clase textural		Franca - Arcillosa - Limosa	Franca - Arcillosa - Limosa	Franca - Arcillosa - Limosa	Arcillosa - Limosa	Arcillosa - Limosa	Arcillosa - Limosa
Contenido de agua másico a -15 bar	%	38	34	30	38	32	29
Contenido de agua másico a -0'33 bar	%	15	15	13	20	19	17
Contenido volumétrico a saturación	%	48	52	43	41	50,7	49,6
Arsénico	mg/Kg sms	3			3,2		
Cadmio	mg/Kg sms	< 1,0			< 1,0		

3.2.3 Agua de riego

El agua utilizada para regar las dos parcelas experimentales, procedente del río Ter (CCRR Rec del Molí) se analizó en un Laboratorio Acreditado en julio de 2017 para determinar sus características químicas (Tabla 3). Los niveles de sales y de nitratos no presentan ninguna limitación para su uso como agua de riego (FAO, 1976).

Tabla 3. Caracterización química del agua de riego.

Parámetros	Unidades	Resultados agua de riego
CE (Conductividad Eléctrica)	dS/m	0,587
Nitratos	meq/l	0,16
Cadmio	µg/l	<0,5
Arsénico	µg/l	2,16

3.3 Sistemas de riego

3.3.1 Riego por inundación continuo (RIC)

El sistema de riego por inundación se accionaba mediante una válvula de compuerta de DN 200 y un contador volumétrico AHS (Canelli, Italia) de DN 80 y caudal nominal de 40 m³/h (Figura 22). El contador volumétrico se instaló en carga, para asegurar su correcto funcionamiento al trabajar de esta forma a sección completa.



Figura 22. Ilustración del hidrante y válvula de compuerta en la parcela RIC.

3.3.2 Riego por goteo (RG)

El sistema de riego por goteo estaba formado por: una tubería principal distribuidora (Figura 23), los laterales de riego porta-goteros, los accesorios de conexión para conectar los laterales de gotero a la tubería principal, un filtro de malla de limpieza semiautomática de 2" (Amiad, Galil Elyon, Israel), un contador volumétrico (Arad, Dalia, Israel) DN 50 y un caudal nominal de $25 \text{ m}^3/\text{h}$, una bomba centrífuga de 1.5 kW , una válvula hidráulica accionada por solenoide de 2", una válvula manual de mariposa DN 50, un programador de riego Rain bird de 4 estaciones (Tucson, USA) y un equipo inyector de fertilizantes tipo Venturi (Amiad, Galil Elyon, Israel). Los laterales consistían en una cinta goteo de 16 mm de diámetro interno y un grosor de 0.2 cm, con emisores integrados no autocompensantes streamline de Netafim (Tel Aviv, Israel) cada 0.4 m que proporcionaban un caudal nominal de 1.05 L/h a una presión de 1 bar (Figura 24). Los laterales se separaron 75 cm.



Figura 23. Tubería principal distribuidora (izquierda) y laterales (derecha) instalados en la parcela RG.



Figura 24. Detalle de la tubería de goteo regando en la parcela RG.

3.4 Variedades

La variedad sembrada en RIC fue Onice y en RG Baldo, ya que se consideró más apta para las condiciones aeróbicas.

3.5 Prácticas culturales

3.5.1 Siembra

El cultivo de arroz tuvo un manejo diferente en función de la parcela. En RIC se sembró el 19 – 05 – 2017, a voleo con el campo inundado y una dosis de 180 kg/ha. En RG se realizó la siembra enterrando la semilla con una sembradora de cereales a líneas (Figura 25) el 12 – 05 – 2017 con una dosis de 150 kg/ha.



Figura 25. Sembradora de cereales a línea sembrando el arroz en la parcela RG.

3.5.2 Manejo del riego

El objetivo de riego en la parcela RIC fue mantener una lámina de agua permanente de entre 5 y 10 cm, exceptuando los períodos en que tenía que entrar maquinaria en el campo para realizar tratamientos fitosanitarios y fertilizar, y durante dos semanas antes de la cosecha. Para conocer el nivel de la lámina de agua se utilizó el equipo de la Figura 26, construido expresamente para esta función.



Figura 26. Equipo para la medición de la lámina de agua en la parcela RIC.

Actualmente no se dispone de datos ni experiencia suficiente para establecer un manejo de riego por goteo en arroz. En la parcela RG el criterio inicial fue mantener un potencial matricial a 15 cm de profundidad de -10 – -15 kPa (Vered, 2017). Sin embargo esta pauta se modificó al inicio del ensayo y antes de la emergencia del cultivo (26 – 05 – 2017) puesto que, por apreciación visual del cultivo y del suelo, se observó falta de agua. Los riegos se realizaron a diario con una duración de media hora hasta tres. Al igual que en la parcela RIC, estos riegos se interrumpían cuando se realizaban tratamientos al campo (herbicidas y fungicidas), pero pasadas 48 horas de los mismos se regaba hasta alcanzar de nuevo el estado de saturación del suelo.

3.5.3 Fertilización

Los programas de fertilización variaron en cada parcela. En RIC el abonado se realizó mediante dos aplicaciones, la primera de fondo a principios de mayo con 300 kg/ha de complejo 8 – 15 – 15 y la segunda de cobertera en junio con 350 kg/ha de urea al 46%. La parcela RIC se fertilizó con un total de 185 unidades de fertilizantes de nitrógeno, 45 unidades de fósforo y 45 unidades de potasio. En RG la fertilización total fue de 151 unidades fertilizantes de nitrógeno, 50 de fósforo y 53 de potasio. El plan de abonado (Tabla 4) se basó en ocho aplicaciones, una primera de fondo en mayo, y posteriormente de cobertera: dos en junio, dos en julio, dos en agosto y la última en setiembre. El abono en RG se aplicó por fertirrigación mediante equipo Venturi (Figura 27). Su funcionamiento se basa en la desviación del agua de la tubería principal con un Venturi, que disminuye la sección de paso del agua, aumentando su velocidad y creando un efecto de succión que permite la incorporación de los fertilizantes desde un depósito al agua de riego (Figura 28).

Tabla 4. Programa de abonado para la parcela RG.

Mes	20 - 0 - 0 (kg/ha)	16 - 30 - 0 (kg/ha)	9 - 0 - 43 (kg/ha)
Mayo	50	60	18
Junio	200	35	20
Julio	225	25	30
Agosto	75	25	30
Setiembre	20	20	20
Total	570	165	118

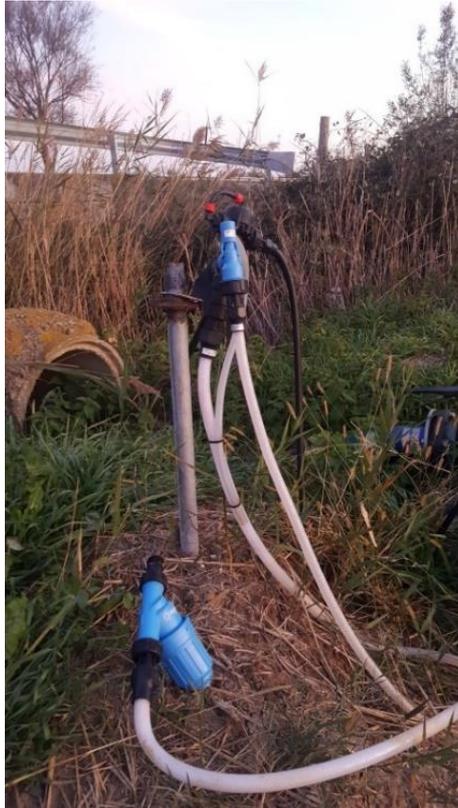


Figura 27. Instalación del equipo de fertirrigación mediante efecto Venturi.



Figura 28. Esquema de su funcionamiento de fertirrigación por efecto Venturi (izquierda, (Martínez, 1998)) y detalle del esquema de un Venturi (derecha, (Hernández, 2018)).

3.5.4 Tratamientos fitosanitarios

En la Tabla 5 se muestran los diferentes tratamientos fitosanitarios (herbicidas y fungicidas) realizados en ambas parcelas (Figura 29).

Tabla 5. Tratamientos fitosanitarios realizados en la parcela RIC y RG.

Fecha	RIC	RG
16/05/2017	Feromonas de confusión sexual para el control de <i>Chilo suppressalis</i> (848 difusores/ha): Z-11-hexadecenal 8,33% (209,2 mg/difusor) + Z-9-hexadecenal 0,82% (20,4 mg/difusor) + Z-13-octadecenal 0,82% (20,4 mg/difusor)	
01/06/2017	Herbicida: cihalofop-butil 20% (1,5 l/ha), profoxidim 20% 80,2 l/ha) y metil oleato/metil palmitato 34,8%	
06/06/2017		Herbicida: penoxsulam 2,04% (2 l/ha), pendimetalina 45,5% (2,5 l/ha) y metil oleato/metil palmitato 34,8% (0,45 l/ha)
22/06/2017	Herbicida: bentazona 48% (sal sódica) (2 l/ha), propanil 48% (1 l/ha) i MCPA 50% (sal dimetilamina) (0,4 l/ha)	
29/06/2017		Herbicida: cihalofop-butil 20% (1,5 l/ha)
02/07/2017	Herbicida: bensulfuron-metil 60% (50 g/ha) y propanil 58% (1 l/ha)	
25/07/2017	Fungicida: picoxistrobin 25% (1 l/ha)	
10/08/2017		Fungicida: procloraz 40% + propiconazol 9% (1,1 l/ha) y picoxistrobin 25% (300 l/ha). Herbicida: cihalofop-butil 20% (1,5 l/ha)
17/08/2017	Fungicida: azoxistrobin 25% (1 l/ha)	



Figura 29. Tractor con ruedas metálicas utilizado en la realización de los tratamientos fitosanitarios. Fotografía izquierda: parte anterior y fotografía derecha: parte posterior.

3.6 Variables determinadas en el ensayo

3.6.1 Clima

3.6.1.1 *Datos agroclimáticos*

En la parcela RG se instaló una estación agroclimática (Figura 30) para la obtención de datos. La estación estaba formada por un datalogger Em50G (Decagon Devices, Pullman, USA) con modem GPRS Europa, un piranómetro autoalimentado (SP-110 (Apogee Instruments, Logan, USA), una placa de nivelación del sensor solar (AL-100 (Apogee Instruments, Logan, USA)), una escuadra para el sensor de luz (M-LBB (Onset Computer Corporation, Bourne, USA)), un pluviómetro de 0'2 mm de resolución (Rain-O-Matic 0'2 OB (Pronamic, Ringkøbing,

Dinamarca) y un anemómetro de cazoletas con veleta (CUP-ANM (Decagon Devices, Pullman, USA)). Todos los datos se manejaron mediante el software DATATRAC III (Datatrac Corporation, Georgia, USA).



Figura 30. Estación agroclimática instalada en la parcela RG.

Por otra parte se analizaron los datos agrometeorológicos referentes a las estaciones climáticas situadas en La Tallada d'Empordà y Monells (Figura 31), que se obtuvieron de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) gestionadas por el Servei de Meteorologia de Catalunya (Ruralcat, 2018). La estación de La Tallada d'Empordà se encuentra en el IRTA (Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias) de Mas Badia a una altitud de 15 m y unas coordenadas UTM (X, Y): 505127'00, 4655771'00. La estación agroclimática de Monells está situada también en el IRTA a una altitud de 60 m y unas coordenadas UTM (X, Y): 499755.00, 4647251.00.

3.6.1.3 Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_o) fue calculada por las estaciones mediante la fórmula FAO Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0'408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0'34 * u_2)}$$

Siendo:

- ET_o , la evapotranspiración de referencia (mm/día).
- Δ , la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C).
- R_n , la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).
- G , el flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹).
- γ , la constante psicométrica (kPa/°C).
- T , la temperatura media del aire a dos metros de altura (°C).
- u_2 , la velocidad del viento a dos metros de altura (m/s).
- e_s , la presión de vapor a saturación (kPa).
- e_a , la presión real de vapor (kPa).

3.6.2 Suelo

3.6.2.1 Potencial matricial

En la parcela RG se instaló un sensor dieléctrico MPS-6 (Decagon Devices, Pullman, USA) para determinar el potencial matricial a 15 cm de profundidad.

3.6.2.2 Contenido de agua del suelo

En cada parcela se instalaron tres sondas de humedad a una profundidad de: 15 cm, 30 cm y 45 cm. El sistema de lectura, almacenamiento y transmisión de datos se hizo vía GPRS mediante un sensor basado en la reflectometría en el dominio de la frecuencia, ECH2O EC-5 (Decagon Devices, Pullman, USA).

3.6.3 Agua del freático y de riego

3.6.3.1 Nivel freático

En cada parcela se instaló un piezómetro de 1'5 m (Figura 32) para determinar la profundidad a la que se encontraba el freático y extraer muestras de agua para determinar su conductividad eléctrica (CE).



Figura 32. Piezómetro instalado en la parcela RIC.

3.6.3.2 Conductividad eléctrica del agua del freático y de riego

Las conductividades eléctricas del agua del freático y de riego se midieron con una sonda Tetracon 325 (WTW, Weilheim, Alemania).

3.6.3.3 Conductividad eléctrica del agua del suelo

Se realizaron lecturas continuas de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_b) a 15 cm de profundidad con un sensor capacitivo 5TE (Decagon Devices, Pullman USA).

Mediante la ecuación propuesta por Hilhorst (2000) se determinó la conductividad eléctrica del extracto a saturación mediante la ecuación:

$$CE_s = CE_b * \frac{\theta}{\theta_s}$$

Siendo:

- CE_s , la conductividad eléctrica del extracto a saturación (dS/m).
- CE_b , la conductividad eléctrica aparente del suelo (dS/m).
- θ , el contenido volumétrico de agua (cm^3/cm^3).
- θ_s , el contenido de agua a saturación (cm^3/cm^3).

Mass y Hoffman (1977) relacionan la disminución del rendimiento del cultivo con los niveles de CEs, cuantificando para el arroz un umbral de salinidad (valor de la CEs a partir del cual la producción se ve afectada) en 3 dS/m.

3.6.3.4 Índices de eficiencia del uso del agua

La cuantificación de la eficiencia del uso del agua se determinó a partir de tres índices. La eficiencia en el uso del agua (WUE, siglas en inglés Water Use Efficiency) se calculó mediante la fórmula:

$$WUE = \frac{Y}{W_T}$$

Siendo:

- WUE, la eficiencia en el uso del agua (kg arroz/(m³ agua riego + lluvia)).
- Y, la producción del cultivo (kg arroz).
- W_T, el agua total de riego y la lluvia precipitada durante el cultivo (m³ agua riego + lluvia).

La eficiencia en el uso del agua de riego (IWUE, siglas en inglés Irrigation Water Use Efficiency) se determinó a través de la fórmula:

$$IWUE = \frac{Y}{W_I}$$

Siendo:

- IWUE, la eficiencia en el uso del agua de riego (kg arroz/m³ agua riego).
- Y, la producción del cultivo (kg arroz).
- W_I, el agua de riego total utilizada durante el cultivo (m³ agua riego).

La eficiencia del riego (E_r) se calculó a través de la fórmula:

$$E_r = \frac{ET_c}{W_I} * 100$$

Siendo:

- E_r, la eficiencia del riego (%).
- ET_c, la evapotranspiración del cultivo (m³/ha).
- W_I, el agua de riego total utilizada durante el cultivo (m³/ha).

3.6.4 **Planta**

3.6.4.1 Estadio fenológico

El estadio fenológico del cultivo se determinó semanalmente mediante las claves de identificación BBCH de arroz (*Oryza sativa L.*) de Lancashire et al. (1991).

3.6.4.2 Evapotranspiración del cultivo

Para determinar la evapotranspiración del cultivo se utilizó la fórmula:

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Siendo:

- ET_c , la evapotranspiración del cultivo (mm/día).
- ET_o , la evapotranspiración de referencia (mm/día).
- K_c , el coeficiente de cultivo (adimensional).

El coeficiente del cultivo (K_c) varía a lo largo del crecimiento del cultivo, por eso se divide en tres etapas: la inicial ($K_{c\text{ inicial}}$), la de mediados de etapa ($K_{c\text{ med}}$) y la final ($K_{c\text{ final}}$). Para el cultivo del arroz se establece una $K_{c\text{ inicial}}$ de 1'1, una $K_{c\text{ med}}$ de 1'2 y una $K_{c\text{ final}}$ de 0'75 (0'9 – 0'6) (FAO, 2006). El $K_{c\text{ med}}$ empieza cuando el cultivo presenta 4 hojas desarrolladas (código 14 según Lancashire et al. (1991)), y el $K_{c\text{ final}}$ al estar el grano maduro (código 89 según Lancashire et al. (1991)).

3.6.4.3 Índice de Área Foliar (LAI)

El Índice de Área Foliar (LAI) es un índice adimensional que se calcula como el cociente entre la superficie foliar y la superficie ocupada por el cultivo. El LAI se determinó mediante dos procedimientos. El primero de ellos, no destructivo, se basó en la utilización semanal de la aplicación móvil POCKET-LAI (Cassandra, Milano, Italia), que utiliza la cámara y el acelerómetro de un teléfono móvil para captar automáticamente una imagen a 57'5° por debajo de las hojas del cultivo, a partir de la cual mediante un algoritmo de segmentación interno no supervisado determina el LAI. El segundo procedimiento, destructivo, se realizó cada dos semanas, escogiendo cuatro plantas al azar de cada parcela. Posteriormente en el laboratorio se escaneaban todas las hojas y se determinaba su área mediante el software de análisis de imagen de licencia abierta ImageJ (National Institute of Mental Health, Maryland, USA).

3.6.4.4 Densidad de plantas

Para la determinación de la densidad del cultivo se utilizó un marco con una superficie interior de un metro cuadrado (Figura 33) que se situó aleatoriamente en distintas zonas del campo para contar las plantas germinadas que se encontraban en el interior. Se realizaron 4 repeticiones en RIC y 5 en RG. Las mediciones se efectuaron el 23 – 06 – 2017 y se utilizaron posteriormente para el cálculo del LAI mediante el método destructivo.



Figura 33. Marco empleado para determinar la densidad del cultivo.

3.6.4.5 Producción

Antes de la recolección se determinaron los componentes del rendimiento en 5 repeticiones para cada sistema de riego (RIC (Figura 34) y RG (Figura 35)). La producción total se calculó a partir de la ecuación:

$$P_{14\%} = E * G * PM * \frac{(100 - (H - 14))}{100}$$

Siendo:

- $P_{14\%}$, la producción con una humedad del 14% (kg arroz/ha).
- E, el número de espigas por metro cuadrado (espiga/ha).
- G, el número de granos por espiga (grano/espiga).
- PM, el peso de mil granos (kg arroz/grano).
- H, la humedad de grano antes de su recolección (%).



Figura 34. Ilustración de la parcela RIC mediante el sistema de riego tradicional por inundación. Se puede observar el trazado por donde circula la maquinaria para realizar los tratamientos fitosanitarios.



Figura 35. Ilustración de la parcela RG mediante el sistema de riego localizado por goteo.

3.7 Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos se ha visto limitado por la ausencia de repeticiones. Esto es debido a que este trabajo se ha enmarcado en un proyecto piloto innovador a través de la creación de Grupos Operativos de la Asociación Europea cuya finalidad principal es la demostración en campo a los agricultores de nuevas técnicas de cultivo innovadoras, más que una investigación rigurosa basada en parcelas de poca superficie y varias repeticiones.

Las variables volumen de agua aplicado en el riego, contenido volumétrico de agua del suelo, nivel freático, potencial matricial, salinidad del suelo y producciones se analizaron mediante el cálculo del promedio, desviación estándar y porcentajes de variación con la finalidad de cuantificar las diferencias entre los tratamientos RIC y RG.

Para estimar el grado de ajuste entre los valores obtenidos en RIC y RG para las variables de desarrollo del cultivo (LAI, estados fenológicos y grados-día) y de los parámetros agroclimáticos (temperaturas medias/máximas/mínimas, precipitaciones, evapotranspiraciones y grados-día) se utilizó el coeficiente de determinación (R^2):

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) * (P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})]^{0.5} * [\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})]^{0.5}} \right\}$$

Siendo:

- O_i , el valor observado.
- \bar{O} , la media de los N valores observados (O_i).
- P_i , el valor predicho.
- \bar{P} , la media de los N valores predichos.

Además, para los parámetros agroclimáticos también se calculó la raíz del error cuadrático medio, el coeficiente de eficiencia NSE y el número de veces (n_t).

La raíz del error cuadrático medio (siglas en inglés RMSE, Root Mean Square Error) se calculó mediante la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}}$$

Los valores de RMSE varían de 0 hasta ∞ , donde un valor de 0 indica un ajuste perfecto.

El coeficiente de eficiencia NSE (Nash and Sutcliffe, 1970) se estimó mediante:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} = 1 - \left(\frac{RMSE}{SD} \right)^2$$

Siendo:

- SD, la desviación estándar de los valores observados (siglas en inglés Standard deviation).

Los valores de NSE varían de $-\infty \leq NSE \leq 1$, donde un valor de 1 indica un ajuste perfecto.

Con tal de conocer la bondad de los ajustes, se calculó el número de veces n_t (en inglés number of times):

$$n_t = \frac{SD}{RMSE} - 1$$

A partir de la Figura 36 se determinó la calidad de los ajustes.

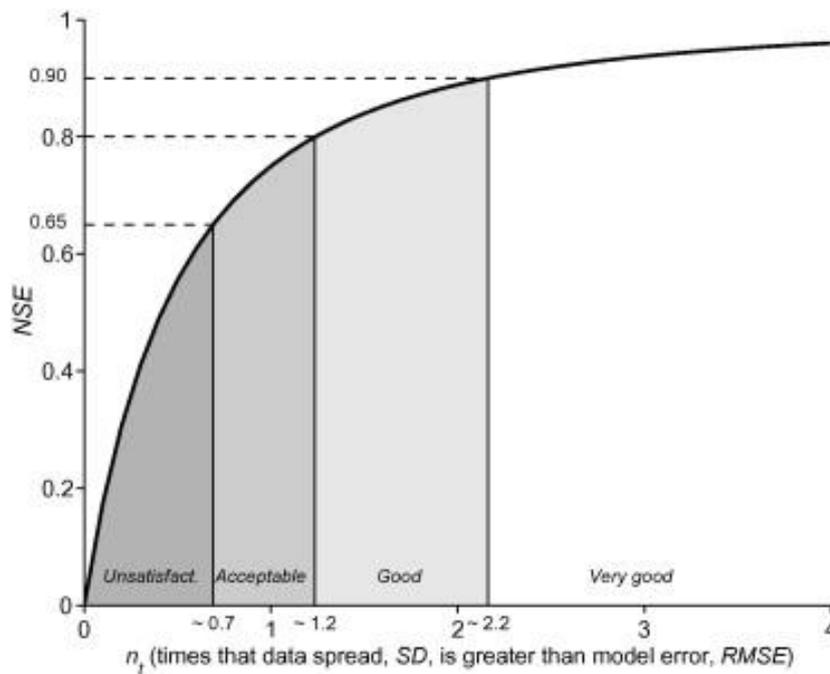


Figura 36. Relación entre NSE y n_t para determinar la calidad del ajuste (Ritter y Muñoz-Carpena, 2013).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del riego y del freático

4.1.1 Volúmenes de agua aplicados en riego

En la Figura 37 se muestran los volúmenes de agua de riego acumulados que se han aplicado en cada parcela. En RIC la cantidad aplicada fue de 14.110 m³/ha, un 70% superior a la del RG que fue de 8.297 m³/ha. Salvador et al. (2011) y Portero (2011) determinaron que, de media en riego por inundación en el Ebro y sur de España, se utilizaban dotaciones de riego entre 11.000 – 12.000 m³/ha, un 20% inferiores que en RIC. El volumen aplicado en RG se asemeja a los 8.000 m³/ha utilizados en un estudio de riego por goteo en India (Soman, 2012).

La diferencia entre RIC y RG probablemente se deba al mantenimiento de la lámina de agua del RIC, que presenta pérdidas por evaporación y tiene que contrarrestar las pérdidas involuntarias causadas por la infiltración y percolación.

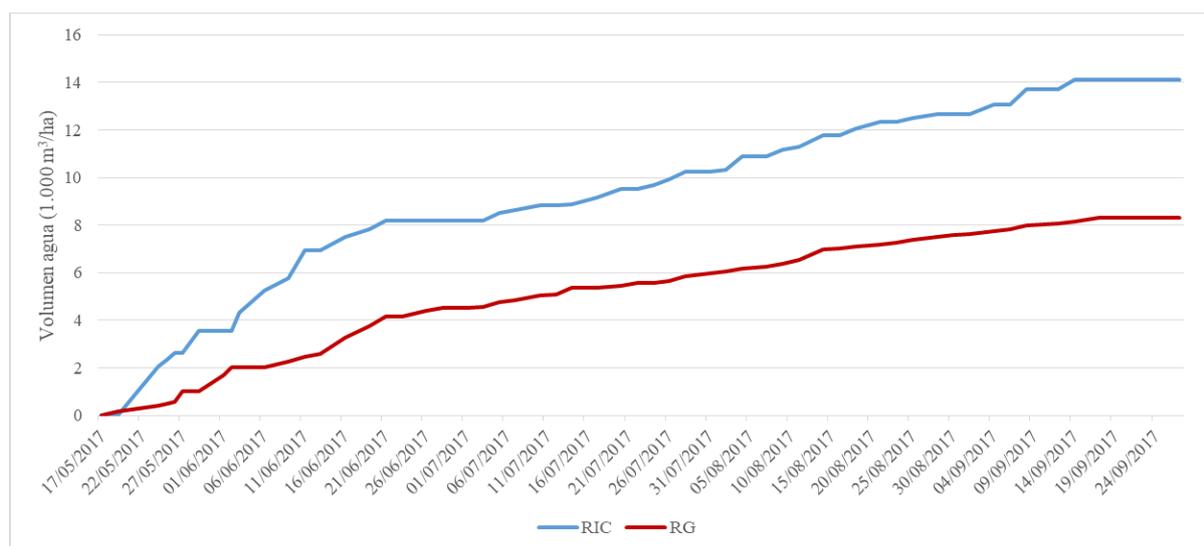


Figura 37. Volúmenes de agua aplicados en RIC y RG.

En la Figura 38 se representa la evolución del total de agua aplicada en el riego más la precipitación, y la evapotranspiración del cultivo en ambas parcelas. Se ha considerado la misma precipitación en RIC y RG. La suma de riego y precipitación en RG fue de 992 mm, un 59% inferior a los 1.574 mm del RIC. La evapotranspiración total del cultivo fue de 687 mm, un 20% inferior a la mínima determinada por Salvador et al. (2011) en el valle del Ebro mediante riego por inundación y un 10% inferior que en el sur de España (Portero, 2011). El aporte hídrico (agua de riego más lluvia) que recibieron RIC y RG fue un 129% y un 44% superior a las necesidades del cultivo, respectivamente.

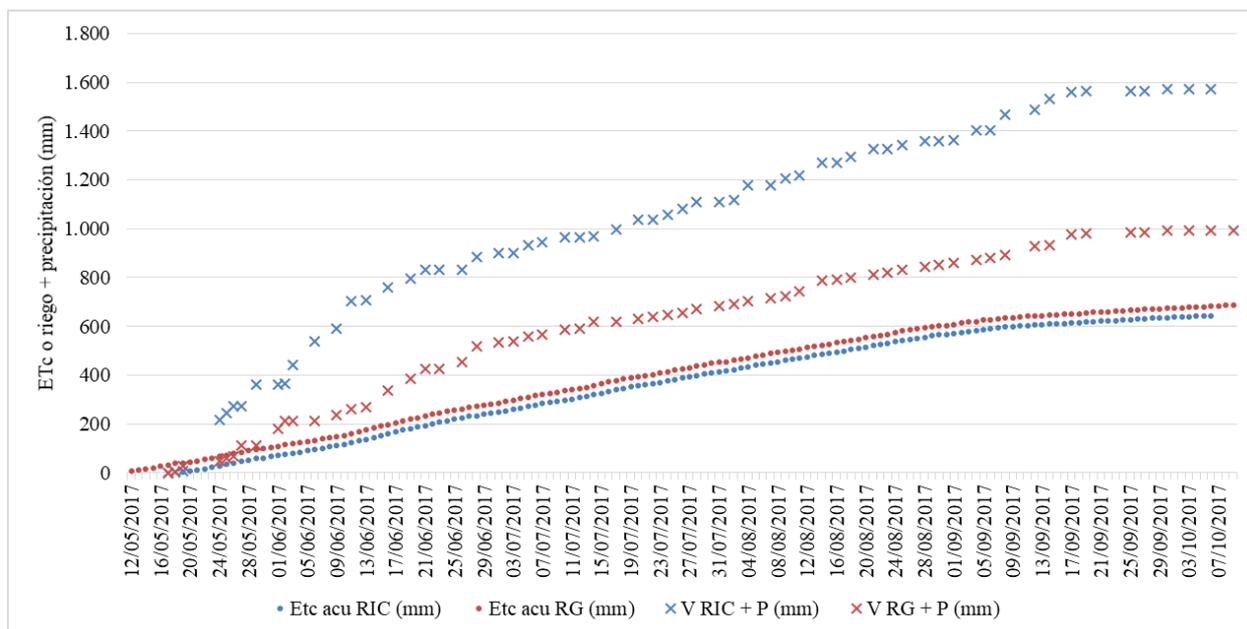


Figura 38. Evapotranspiración del cultivo y volumen de agua aplicados en riego más precipitación en RG y RIC (datos de evapotranspiración de referencia previas al 09 – 06 – 2017 extraídas de la estación climatológica de La Tallada d’Empordà).

4.1.2 Contenido volumétrico de agua del suelo

El contenido volumétrico de la parcela RIC se ha mantenido muy constante tanto en el tiempo como en profundidad (Figura 39). Los promedios a 15, 30 y 45 cm fueron del $44'3 \pm 0'24\%$, el $47'8 \pm 0'29\%$ y el $43'6 \pm 0'29\%$, respectivamente. A 15 y 45 cm el suelo estuvo en estado permanente de saturación, de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 2. La causa de que se alcanzara el estado de saturación permanente a estas 2 profundidades fueron respectivamente la existencia de la lámina de agua superficial y el alto nivel freático existente, que sin embargo no fueron suficientes para que la profundidad intermedia entre ambas (30 cm) se mantuviera también a saturación, aunque sí en valores muy cercanos.

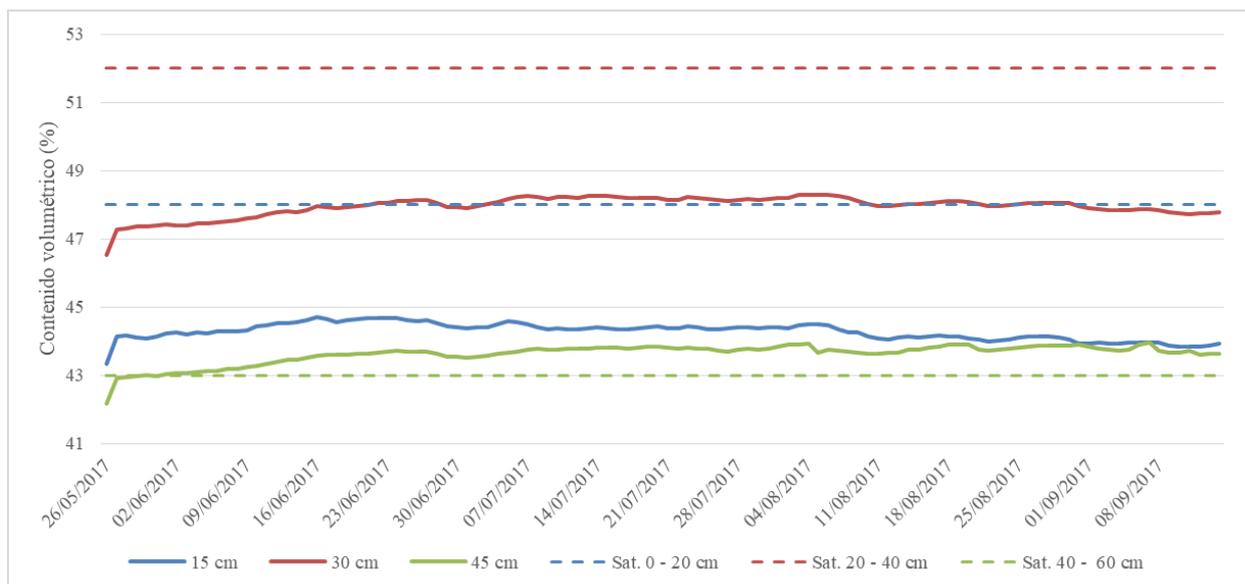


Figura 39. Porcentaje de contenido volumétrico de agua del suelo y a saturación a una profundidad de 15, 30 y 45 cm en RIC.

En la Figura 40 se aprecian las variaciones del contenido volumétrico que experimentó la parcela RG en los primeros centímetros. Los promedios de los contenidos volumétricos a 15, 25 y 45 cm fueron del $37'0 \pm 4'1\%$, el $46'5 \pm 1'1\%$ y el $45'8 \pm 0'5\%$ respectivamente. El inferior contenido volumétrico de agua del suelo de los primeros días representados en el gráfico se asocia a una disminución del potencial matricial (Figura 41), causada por el aumento de la dotación hídrica de riego aconsejada por Vered (2017) el 26 de mayo. El contenido volumétrico a 15 cm fluctúa en el tiempo y se distinguen tres picos donde disminuye. El primero se asocia a una parada del riego del 2 al 8 de junio para realizar un tratamiento herbicida. El segundo se debe a que el día 14 – 07 – 2017 se detuvo el riego para (regar cuando el potencial matricial disminuyera) (Figura 40) pero se reanudó al cabo de unos días ya que, por apreciación visual, el cultivo presentaba déficit hídrico. El tercer pico fue a causa de la detención del riego para la realización de un tratamiento herbicida y funguicida.

El RG, a diferencia del RIC, no estuvo en estado de saturación (Tabla 2) por lo que las variaciones del contenido volumétrico fueron mayores a 20 cm.

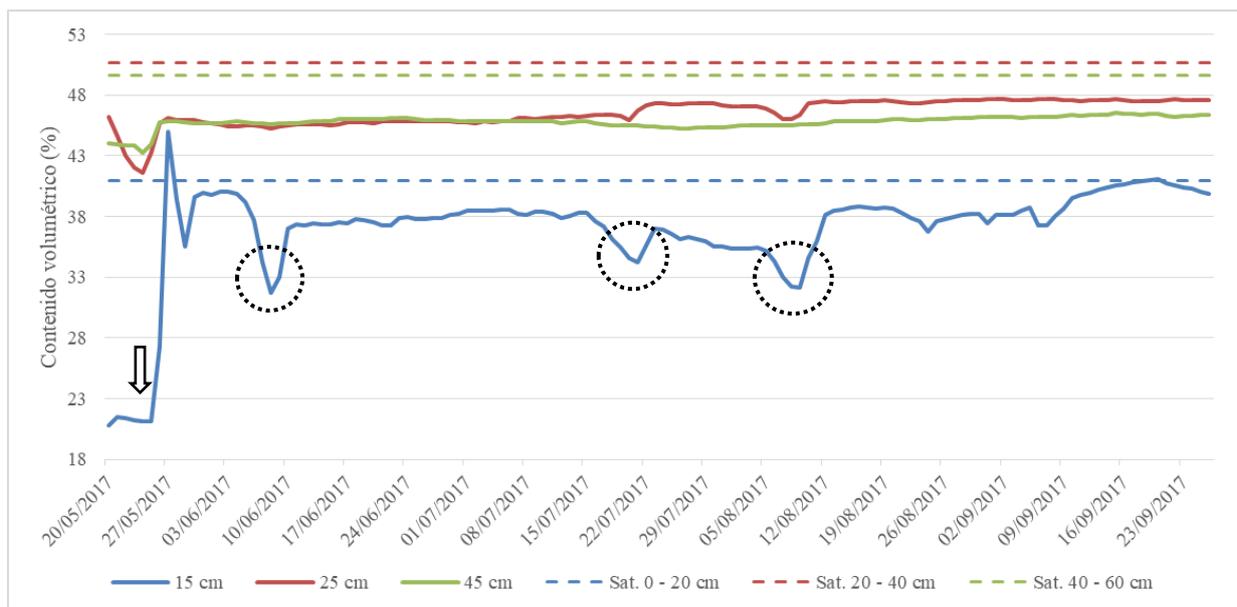


Figura 40. Porcentaje de contenido volumétrico de agua del suelo y a saturación a una profundidad de 15, 25 y 45 cm en RG.

4.1.3 Potencial matricial

La evolución del potencial matricial en la parcela RG se muestra en la Figura 41. Durante los primeros días el cultivo se intentó mantener a -15 kPa pero como, por apreciación visual (Vered, 2017), presentaba déficit hídrico se mantuvo a -10 kPa. Por eso a partir del 26 de mayo el potencial matricial disminuyó y se mantuvo constante con un promedio de -10.2 ± 0.2 kPa. Las tres variaciones posteriores se pueden relacionar con las de los contenidos volumétricos de RG (Figura 40) puesto que coinciden en el tiempo.

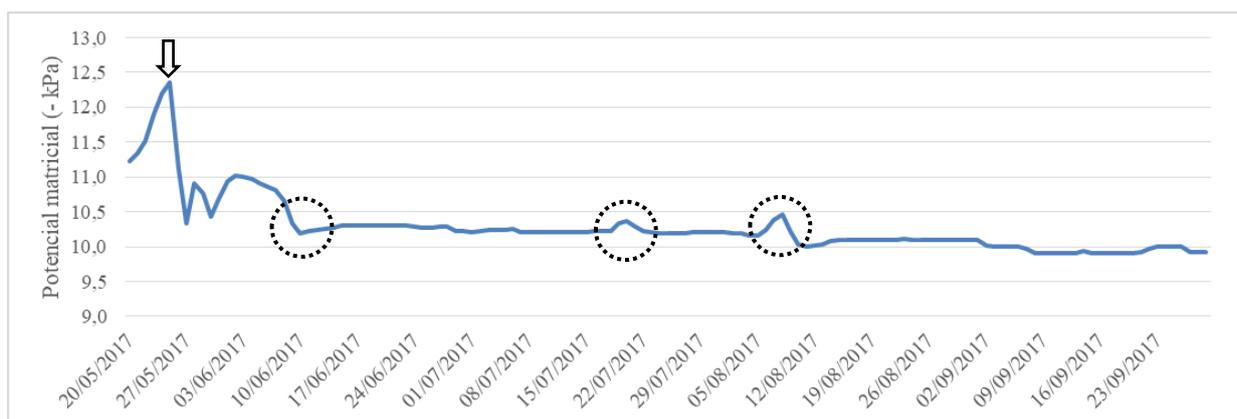


Figura 41. Potencial matricial del campo de la parcela RG.

4.1.4 Nivel freático

En la Figura 42 se representa la variación del nivel freático en RIC y RG. El promedio en RG fue de 29 ± 4.1 cm por debajo de la superficie del suelo, un 14.6% superior a los 25.3 ± 3.4 cm de promedio de RIC. Generalmente el nivel se mantuvo más alto en RIC, posiblemente

porque el campo se encontraba en estado de saturación a 45 cm y a partir del 4 de agosto probablemente acumuló más agua por percolación. Otro aspecto que pudo influir es el uso de las parcelas colindantes, que en el caso de RIC eran campos con sistema de riego por inundación continua y RG lindaba con un campo de manzanos y una carretera asfaltada.

No se han conseguido relacionar las variaciones del nivel freático con las prácticas culturales ni las precipitaciones (Figura 56). El contenido volumétrico en RIC se mantuvo constante en todo el perfil (Figura 39), y en RG las tres disminuciones coincidentes a 15 cm de profundidad en el contenido volumétrico (Figura 40) y el potencial matricial (Figura 41) no tuvieron repercusión en el nivel freático, como se aprecia en la Figura 42.

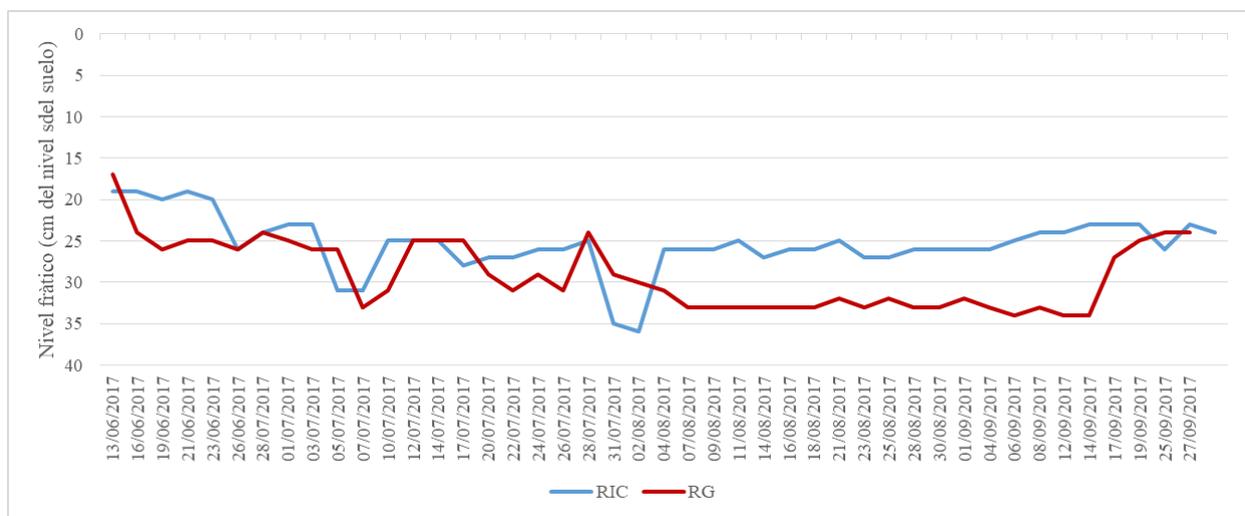


Figura 42. Nivel freático en la parcela RIC y RG.

4.1.5 Salinidad del agua del freático

La conductividad eléctrica (CE) del agua del freático del RIC tuvo un promedio de $0'88 \pm 0'3$ dS/m, mientras que el de goteo fue un 670% superior, con $6'78 \pm 0'16$ dS/m (Figura 43).

Probablemente la superior dotación hídrica en RIC permitió un mayor lavado de las sales, aumentando su concentración en RG, pero la falta de datos desde el inicio del cultivo imposibilita llegar a una conclusión firme.

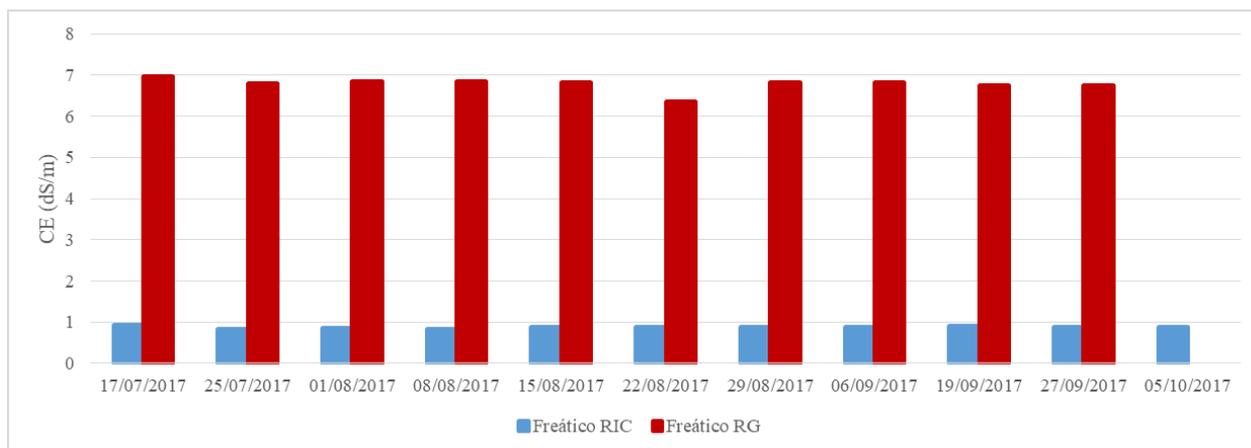


Figura 43. Conductividad eléctrica del agua del freático en la parcela RIC y RG.

4.1.6 Salinidad del agua de riego y de drenaje

En la Figura 44 se representan los valores de CE del agua que se utilizó para regar, así como la del drenaje superficial de la parcela RIC y RG. El promedio de la CE del agua de riego fue de 0.62 ± 0.04 dS/m, la mitad de los 1.2 dS/m a partir de los cuales la plántula de arroz empieza a sufrir estrés salino (Portero, 2011). En el drenaje de RG el promedio fue de 0.70 ± 0.11 dS/m y en RIC de 0.76 ± 0.06 dS/m, siendo un 13.7% y 24.3%, respectivamente, superiores a la del agua de riego. Probablemente el drenaje RIC presentó más sales por la mayor dotación hídrica, que favoreció un mayor lavado de sales.

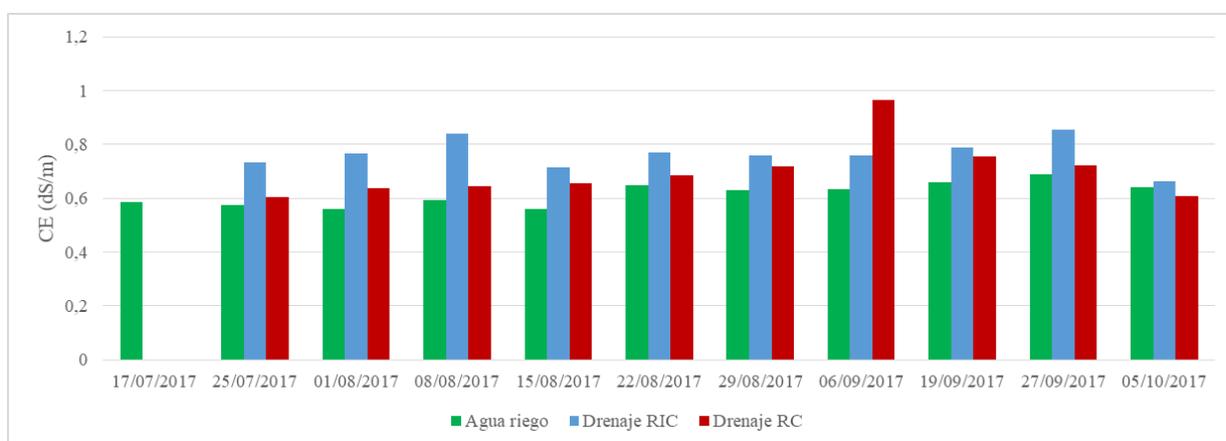


Figura 44. Conductividad eléctrica del agua empleada en el riego y del drenaje de la parcela RIC y RG.

4.1.7 Conductividad eléctrica del suelo

La evolución de la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE_s) del suelo a 15 cm de profundidad se muestra en la Figura 45 y se relaciona con la salinidad del suelo. El promedio en la parcela RIC y RG fue de 3.3 ± 0.1 dS/m y de 4.6 ± 0.7 dS/m, respectivamente.

En RIC el sensor no se pudo instalar hasta principios de agosto, momento a partir del cual la CE_s se mantuvo bastante constante en el tiempo. Esto parece indicar que cuando el contenido de agua del suelo se mantiene a saturación la lectura del sensor no varía.

En RG las cinco disminuciones coinciden en el tiempo con paradas de riego para la realización de tratamientos fitosanitarios, así como las variaciones de contenido volumétrico en los primeros 15 cm del suelo (Figura 45). Estos descensos bruscos de la CE_s sólo pueden atribuirse al método utilizado para la medida y no permiten hacer una interpretación rigurosa de la dinámica de salinidad del suelo que ha tenido lugar.

Los resultados muestran que a pesar de que el método de determinación de la CE_s está recogido en bibliografía científica (Hilhorst, 2000) es necesario profundizar en su aplicación y contrastarlo con el método de toma de muestra en campo y posterior determinación en laboratorio mediante lectura de la CE en el extracto de pasta saturada.

Atendiendo a que la desviación típica de los resultados obtenidos en RIC y RG es muy baja, y tomando como valores de referencia los promedios obtenidos en cada caso, la reducción potencial en la producción de acuerdo con Mass y Hoffman (1977) sería del 4% en RIC y del 19% en RG.

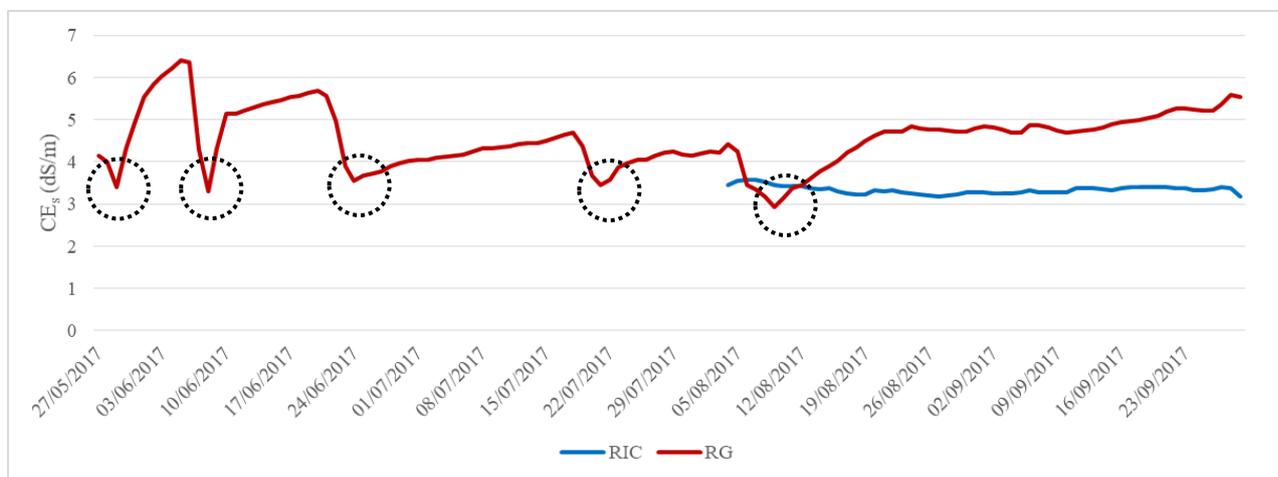


Figura 45. Conductividad eléctrica en el extracto de pasta saturada del suelo en RIC y RG.

4.1.8 Producciones

En la Tabla 6 se muestran las producciones obtenidas por cada sistema de riego y los componentes que han afectado al rendimiento. En RIC las producciones fueron un 16'5% superiores a las obtenidas en RG. Esta diferencia se debe principalmente a que el peso de 1.000 granos fue un 17'3% superior en la parcela RIC, ya que el número de granos por espiga y el número de espigas por metro cuadrado son similares (no difieren más de un 5%).

El peso de 1.000 granos de la variedad Onice en RIC fue similar (un 0'6% inferior) al determinado por la características de esta variedad (Ente Nazionale Rici, 2012). En RG el peso obtenido fue un 25% inferior al caracterizado por Bertone Sementi (2018).

La producción en RIC fue un 5% inferior a la determinada por la variedad Onice (ERSAF, 2011) y superior a las 6 t/ha de media en la zona del Baix Empordà (Figura 9) pero inferior a las 7'8 t/ha de España (Figura 3). En RG la producción fue similar a las obtenidas en un experimento realizado en China por Xue et al. (2007), y superior a la media de 3'5 t/ha que obtuvieron arrozeros en China (Bouman et al., 2007).

De acuerdo con Mass y Hoffman (1977) las producciones habrían aumentado hasta llegar a 6.756 kg/ha en RIC y 6.870 kg/ha en RG si el cultivo no hubiera estado en condiciones de estrés por salinidad (Figura 45). Entre las causas de la menor producción en RG probablemente esté la salinidad del suelo.

Tabla 6. Componentes del rendimiento y producciones obtenidas en RIC y RG.

Sistema riego	Núm. Espigas/m ²	Granos/espiga	Humedad (%)	Peso 1.000 granos (g)	Producción 14% (kg/ha)
RIC	235	80,8	18,8	35,2	6.486
RG	246	79,0	16,7	30,0	5.565

4.1.9 Índices de eficiencia del uso del agua

El RG presenta una eficiencia en el uso del agua (WUE) y una eficiencia en el uso del agua de riego (IWUE) superior en un 36% y 46% al RIC (Tabla 7). El valor de IWUE obtenido en RIC es muy similar a los 0'45 kg/m³ que determinó Salvador et al. (2011) en el valle del Ebro e inferior a la media establecida por Sánchez-Llerena et al. (2016) en Extremadura. Los valores de WUE en RIC son muy buenos, un 28% y 156% superiores comparados con los 0'32 kg/m³ obtenidos en la India por Rumulu et al. (2016) y con los 0'16 kg/m³ en Taiwán por Pascual y Wang (2017). Aunque las producciones hayan sido superiores en RIC (Tabla 6) la técnica RG tiene una mejor eficiencia del riego, ya que la E_r fue un 81% superior que en RIC. Hay que tener presente que estas eficiencias son una simplificación del balance hídrico ya que, entre otros factores, no se ha tenido presente la percolación, la escorrentía, el agua destinada a realizar el fangueo o el mantenimiento de la lámina en RIC.

Tabla 7. Índices de eficiencia obtenidos en el uso del agua.

Índice de eficiencia	RIC	RG
WUE (kg arroz/ (m ³ agua riego + lluvia))	0,41	0,56
IWUE (kg arroz/ m ³ agua riego)	0,46	0,67
E _r (%)	45,69	82,83

4.2 Caracterización del desarrollo del cultivo

4.2.1 Índice de Área Foliar (LAI)

En la Figura 46 se representa la evolución del Índice de Área Foliar (LAI) calculado manualmente a partir de las densidades (Tabla 8). La curva descrita en RIC se ajusta bien a la esperada (Figura 47), pero no tanto en RG. Los valores obtenidos son muy superiores a otros estudios realizados. En China, Wang et al. (2017) y Fang et al. (2014) mediante riego por inundación obtuvieron LAI máximos de 6'8 m²/m² y 5 m²/m², respectivamente. Polón et al. (2012) calcularon un valor máximo de 7 m²/m² en Cuba, un 75% y 58% inferior que en RIC y RG, respectivamente. Otros estudios obtuvieron valores máximos de LAI de 2 – 3'5 m²/m², siendo éstos inferiores a los mínimos LAI calculados en RIC y RG. La diferenciación entre plantas y macollas en el caso del arroz es muy difícil. Esta circunstancia y el alto porcentaje de ahijamiento pueden haber distorsionado al alza los valores de LAI.

Tabla 8. Muestreo realizado en la parcela RIG y RG para determinar la densidad.

Muestra	Densidad (planta/m ²)	
	RIC	RG
Muestra 1	274	262
Muestra 2	378	205
Muestra 3	207	202
Muestra 4	199	195
Muestra 5	-	174
Promedio	264 ± 83	207 ± 33

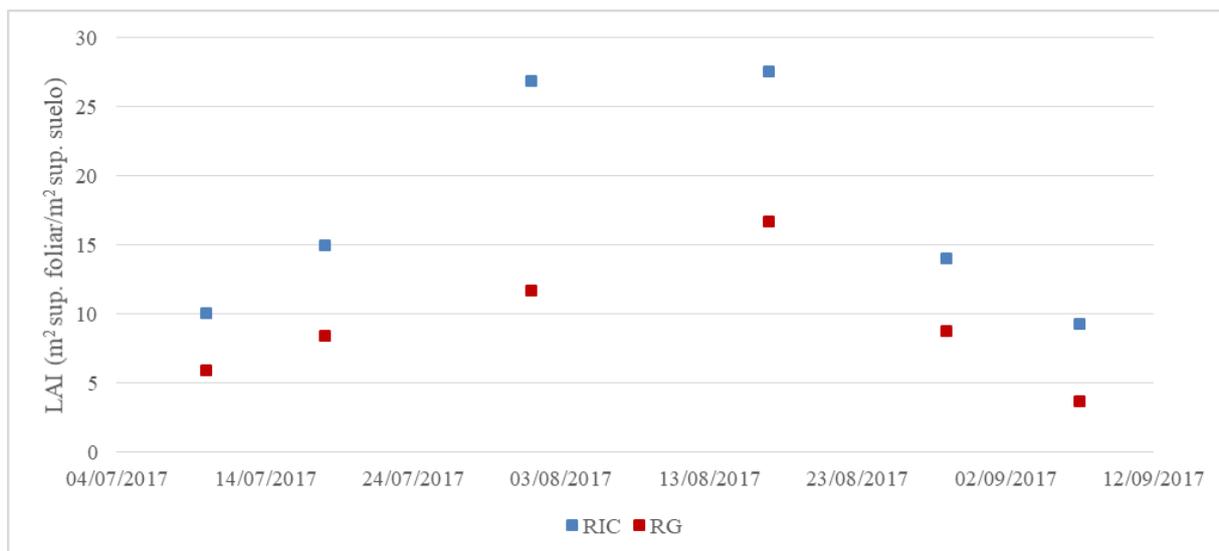


Figura 46. Índice de Área Foliar (LAI) determinada manualmente en la parcela RG y RIC.

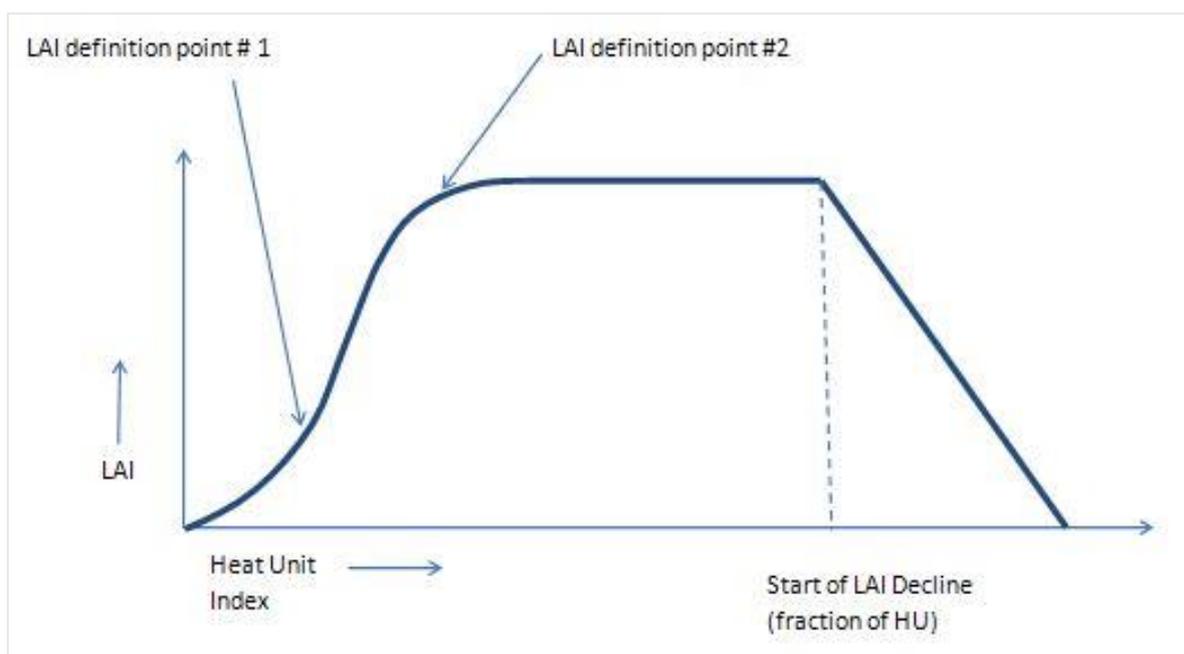


Figura 47. Esquema de la evolución del Índice de Área Foliar (LAI) (WEAP, 2018).

En la Figura 48 se muestra la evolución del Índice de Área Foliar (LAI) calculado con el POCKET-LAI en ambas parcelas. Los valores máximos situados entre 3'5 – 5'5 m²/m² son similares a los obtenidos por métodos destructivos por Stuerz et al. (2014) y Villalba et al. (2017). Un estudio reciente realizado en arroz por Campos-Taberner et al. (2016) concluyó un buen ajuste de los resultados obtenidos con PocketLAI frente otras herramientas como el LAI-2000 y el DHP. En otros cultivos también se obtuvieron buenos ajustes con esta aplicación (Francone et al., 2014 y Orlando et al., 2016). Los valores obtenidos, en RIC y RG,

son muy dispersos y con un coeficiente de correlación R^2 muy bajo (0'5). Probablemente las determinaciones se debieron realizar en el mismo punto de la parcela.

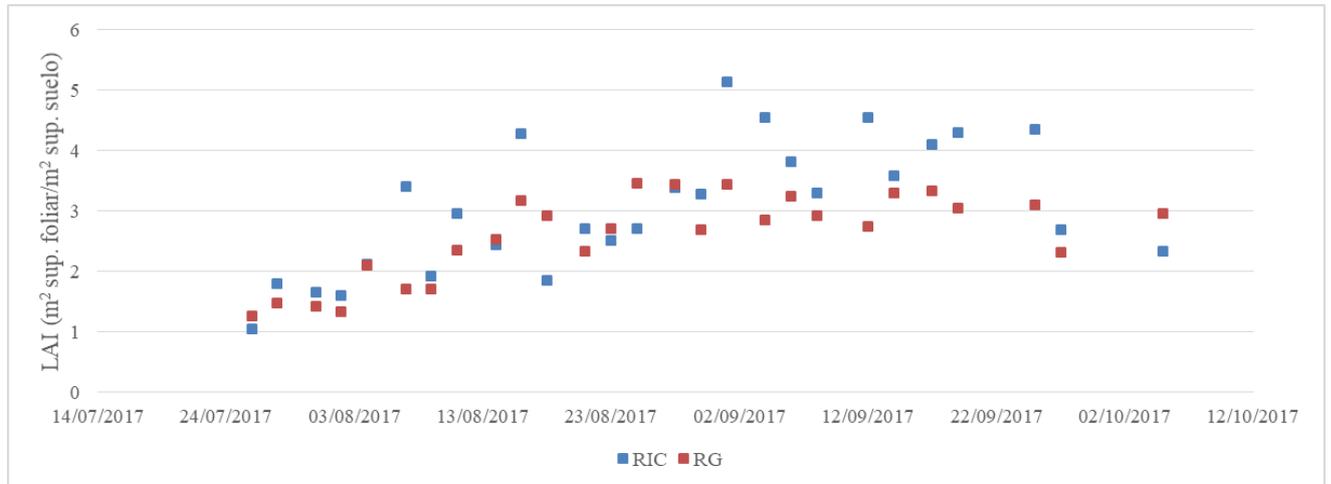


Figura 48. Índice de Área Foliar (LAI) determinada con el POCKET-LAI en la parcela RG y RIC.

4.2.2 Fenología

En la Tabla 9 se muestra la evolución de los estados fenológicos del cultivo según Lancashire et al. (1991) en RIC y RG. A pesar de que la parcela RIC se sembró una semana antes que la RG no se observan diferencias importantes en relación a las fechas en que se alcanzaron los diferentes estados. El coeficiente de correlación R^2 entre ambos conjuntos de datos fue muy alto (0,99).

Tabla 9. Estadio fenológico del arroz según Lancashire et al. (1991) en RIC y RG.

Fecha	RIC	RG	Fecha	RIC	RG
12/05/2017		siembra	31/07/2017	34	34
19/05/2017	siembra		02/08/2017	34	34
01/06/2017	10	11	04/08/2017	34	37
06/06/2017	12	13	07/08/2017	37	37
09/06/2017	13	13	09/08/2017	51	51
11/06/2017	14	14	11/08/2017	53	52
13/06/2017	14	14	14/08/2017	56	56
16/06/2017	14	14	16/08/2017	57	57
19/06/2017	14	14	18/08/2017	58	58
21/06/2017	23	14	21/08/2017	65	65
23/06/2017	23	22	23/08/2017	71	69
26/06/2017	23	22	25/08/2017	75	71
28/06/2017	26	25	28/08/2017	77	75
01/07/2017	26	25	30/08/2017	85	83
03/07/2017	26	25	01/09/2017	87	87
05/07/2017	27	25	04/09/2017	89	87
07/07/2017	27	25	06/09/2017	89	87
10/07/2017	27	26	08/09/2017	89	89
12/07/2017	27	25	12/09/2017	89	89
14/07/2017	28	26	14/09/2017	92	89
17/07/2017	28	26	17/09/2017	92	89
20/07/2017	28	26	19/09/2017	92	92
22/07/2017	28	30	25/09/2017	97	92
24/07/2017	28	30	27/09/2017	97	97
26/07/2017	30	30	05/10/2017	97	97
28/07/2017	30	30			

4.2.3 Grados-día (GDD)

En la Figura 49 se muestran los grados día acumulados (GDD) y algunos estados fenológicos característicos. Hay que tener presente que las variedades sembradas no fueron las mismas y sus condiciones de riego tampoco. A excepción de la emergencia de la panícula en los demás estadios fenológicos el arroz de RIC necesitó menos GDD para crecer, llegando al estado de maduración con un 5'12% menos GDD respecto la parcela RG. Esto podría deberse a la longitud del ciclo vegetativo, que se establece en 135 días para la variedad Onice (ERSAF, 2011) y en 141 – 150 días en Baldo (Bertone Sementi, 2018). El ajuste entre ambos conjuntos de datos fue muy bueno ($R^2 = 0,99$).

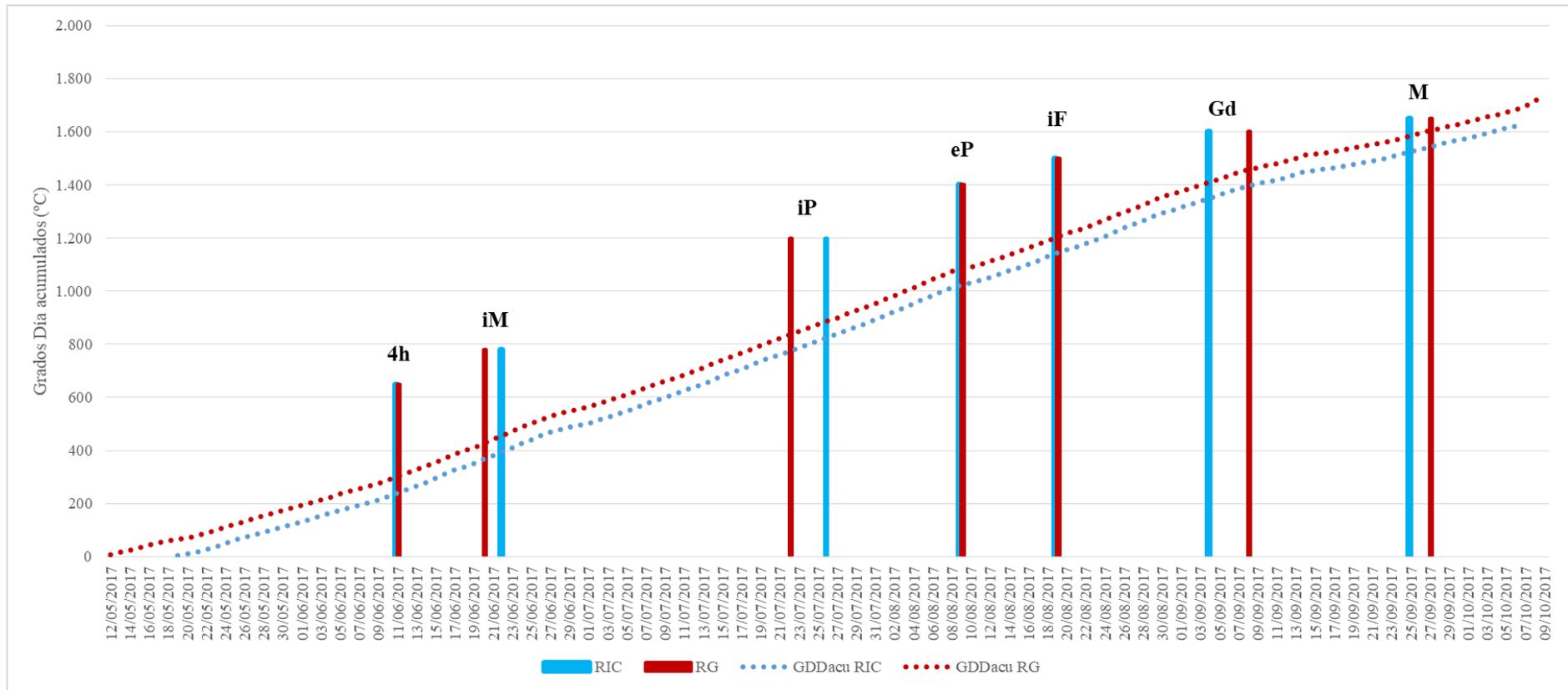


Figura 49. Grados día acumulados y estadios fenológicos de la parcela RIC y RG. Leyenda: 4h (cuatro hojas), iM (inicio de macollamiento), iP (inicio formación panícula), eP (emergencia panícula), iF (inicio floración), Gd (grano duro) y M (muerte de la planta).

4.3 Parámetros agroclimáticos

4.3.1 Temperatura mediana

El promedio de las temperaturas medianas (T_m) fue de 21'9°C, 21'7°C y 22'2°C en La Tallada d'Empordà, la parcela y Monells, respectivamente (Figura 50). Los días en que las T_m decrecieron coinciden en tiempo con precipitaciones en la zona (Figura 56). En la Figura 51 se aprecia que, generalmente, las diferencias de T_m respecto las de la parcela son positivas, siendo éstas inferiores con un promedio de $0'2 \pm 0'6^\circ\text{C}$ a las de La Tallada d'Empordà y de $0'6 \pm 1^\circ\text{C}$ con las de Monells. Estadísticamente se considera que el ajuste entre los datos es correcto (Tabla 10), por lo que sería innecesaria la instalación de un termómetro a pie de parcela.

Tabla 10. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a las temperaturas medianas entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R^2	RMSE	NSE	n_t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,97	0,66	0,96	3,93	Muy bueno
Monells - Parcela	0,94	1,18	0,88	1,92	Bueno

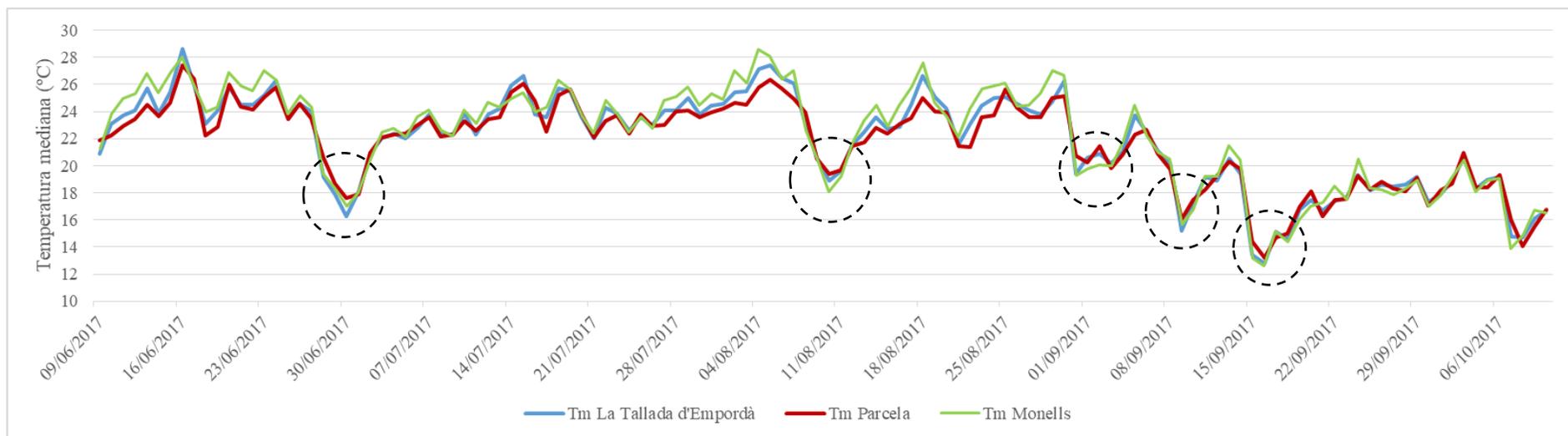


Figura 50. Temperaturas medianas diarias obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, de la parcela y Monells.

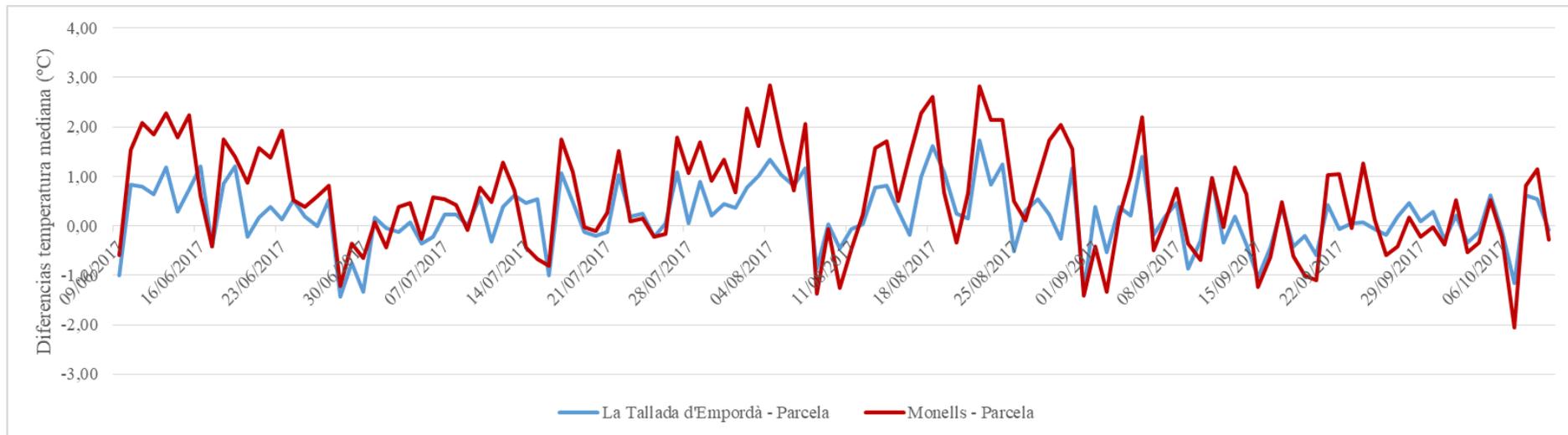


Figura 51. Diferencias de las temperaturas medianas obtenidas entre las estaciones de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

4.3.2 Temperatura máxima

La evolución de las temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) de La Tallada d'Empordà, la parcela y Monells se representa en la Figura 52, donde los promedios fueron de 28'2°C, 26'7°C y 29'4°C, respectivamente. En general, las menores $T_{\text{máx}}$ corresponden a las de la parcela, posiblemente a causa de su mayor proximidad al mar, que mitigaría las temperaturas. Se aprecian disminuciones en las $T_{\text{máx}}$ relacionadas con las lluvias en cada zona (Figura 56). Las diferencias de temperatura de las estaciones respecto la parcela tienen un promedio de $1'5 \pm 1'2^\circ\text{C}$ con La Tallada d'Empordà y de $2'7 \pm 1'6^\circ\text{C}$ con Monells, llegando a una diferencia de hasta 6°C (Figura 53). Los datos obtenidos en La Tallada d'Empordà se ajustan a los de la parcela, mientras que los de Monells no (Tabla 11), por lo que sería recomendable la instalación de un termómetro a pie de parcela.

Tabla 11. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a las temperaturas máximas entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R^2	RMSE	NSE	n_t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,90	1,89	0,68	0,77	Aceptable
Monells - Parcela	0,89	3,10	0,32	0,22	Inaceptable

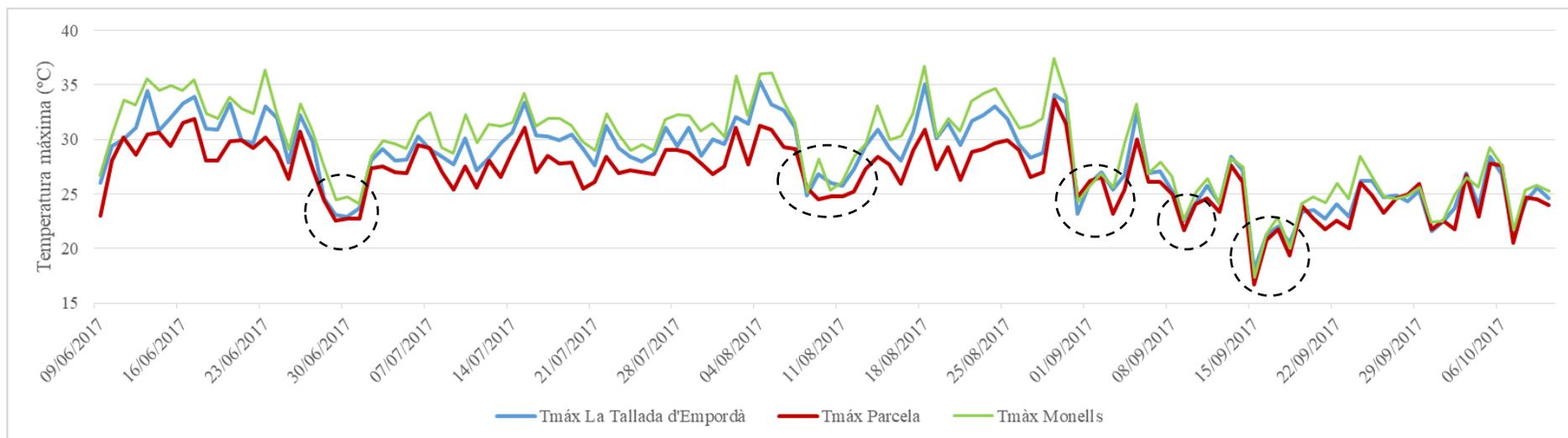


Figura 52. Temperaturas máximas diarias obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, de la parcela y Monells.

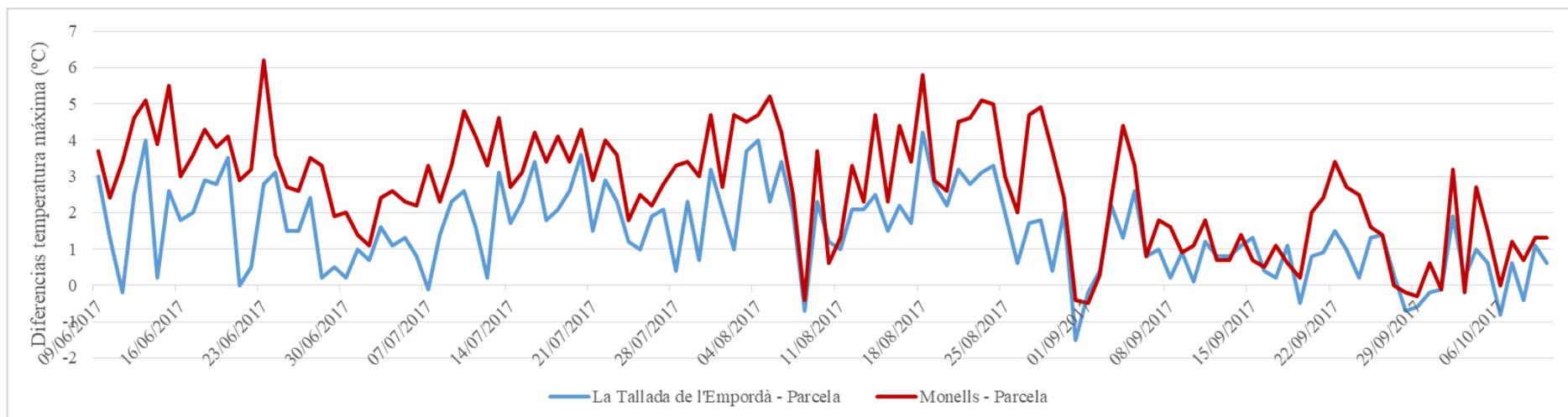


Figura 53. Diferencias de las temperaturas máximas obtenidas entre las estaciones de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

4.3.3 Temperatura mínima

En La Tallada d'Empordà, la parcela y Monells el promedio de las temperaturas mínimas ($T_{\text{mín}}$) fue de $16'1^{\circ}\text{C}$, $16'6^{\circ}\text{C}$ y $15'4^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Figura 54). Las menores $T_{\text{mín}}$ se pueden vincular a las precipitaciones que se produjeron en el periodo (Figura 56).

Generalmente, las $T_{\text{mín}}$ más altas son las de la parcela, siendo de promedio un $0'6 \pm 0'8^{\circ}\text{C}$ y $1'3 \pm 1'3^{\circ}\text{C}$ superiores a las de La Tallada d'Empordà y Monells, respectivamente (Figura 55). La mayor proximidad al mar podría ser la causante de la atenuación de las temperaturas en la parcela frente a la de las estaciones. El ajuste de los datos es bueno (Tabla 12) por lo que resulta prescindible la instalación de un termómetro a pie de parcela.

Tabla 12. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a las temperaturas mínimas entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R^2	RMSE	NSE	n_t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,94	0,99	0,92	2,44	Muy bueno
Monells - Parcela	0,86	1,81	0,73	0,93	Aceptable

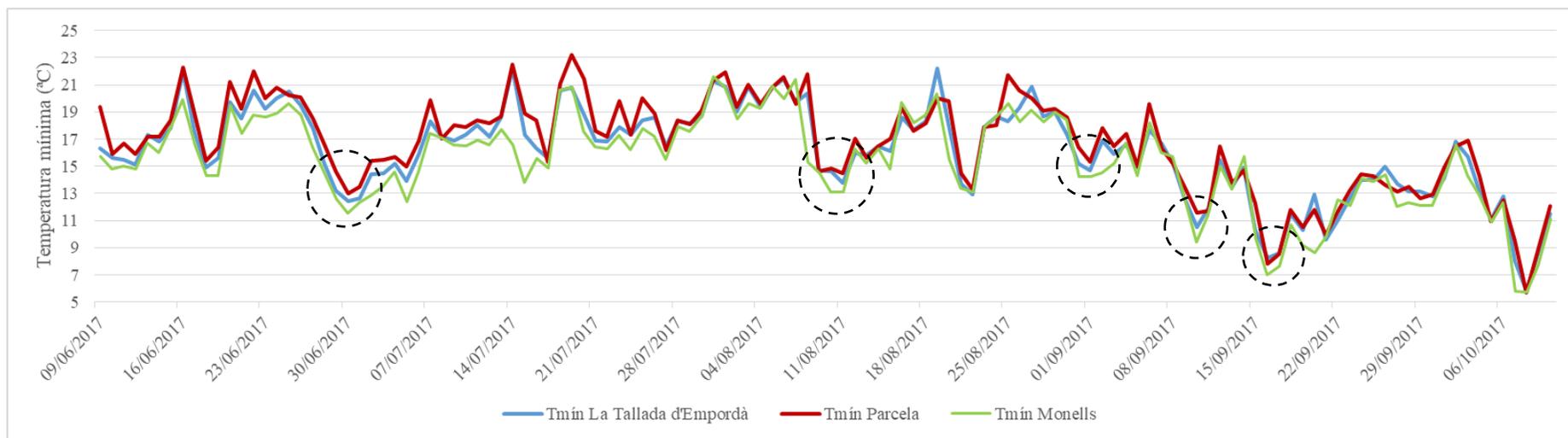


Figura 54. Temperaturas mínimas diarias obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, de la parcela y Monells.

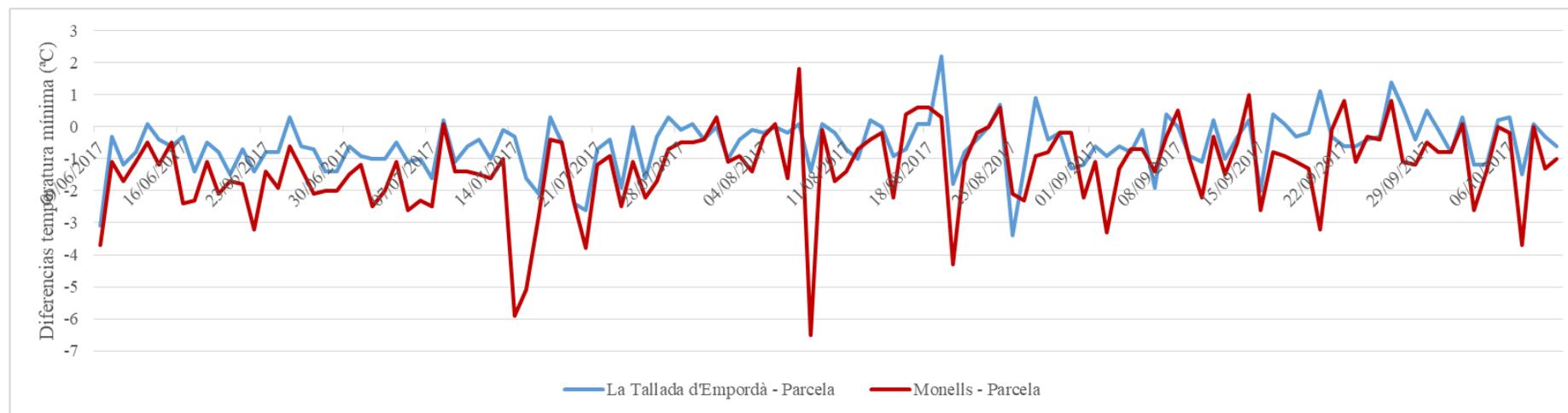


Figura 55. Diferencias de las temperaturas mínimas obtenidas entre las estaciones de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

4.3.4 Precipitación diaria y acumulada

La precipitación diaria en las tres estaciones se representa en la Figura 56, donde se aprecian dos fuertes lluvias a finales del mes de junio, unos meses de julio y agosto muy áridos, y un septiembre con dos precipitaciones importantes. Se pueden relacionar claramente las precipitaciones a disminuciones de las T_m (Figura 50), las $T_{m\acute{a}x}$ (Figura 52), las $T_{m\acute{m}n}$ (Figura 54), evapotranspiraciones (Figura 59) y grados-día (Figura 62).

En la parcela llovió en total 151'6 mm, un 2'8% menos que en La Tallada d'Empordà y un 34'1% más que en Monells (Figura 57). Según los datos obtenidos, sería necesario un pluviómetro si se cogieran como referencia las precipitaciones de Monells (Tabla 13), pero al variar éstas en intensidad, duración y espacio, es recomendable la instalación de un pluviómetro a pie de parcela.

Tabla 13. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a las precipitaciones diarias entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R^2	RMSE	NSE	n_t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,93	1,53	0,92	2,63	Muy bueno
Monells - Parcela	0,80	3,30	0,46	0,36	Inaceptable

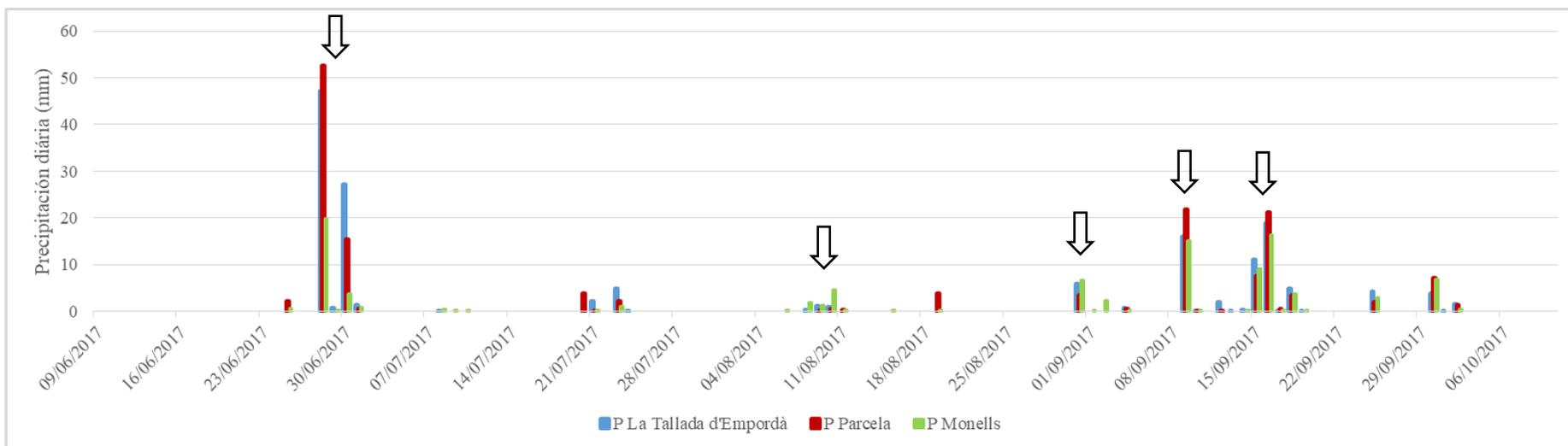


Figura 56. Precipitaciones diarias obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, en la parcela y Monells.

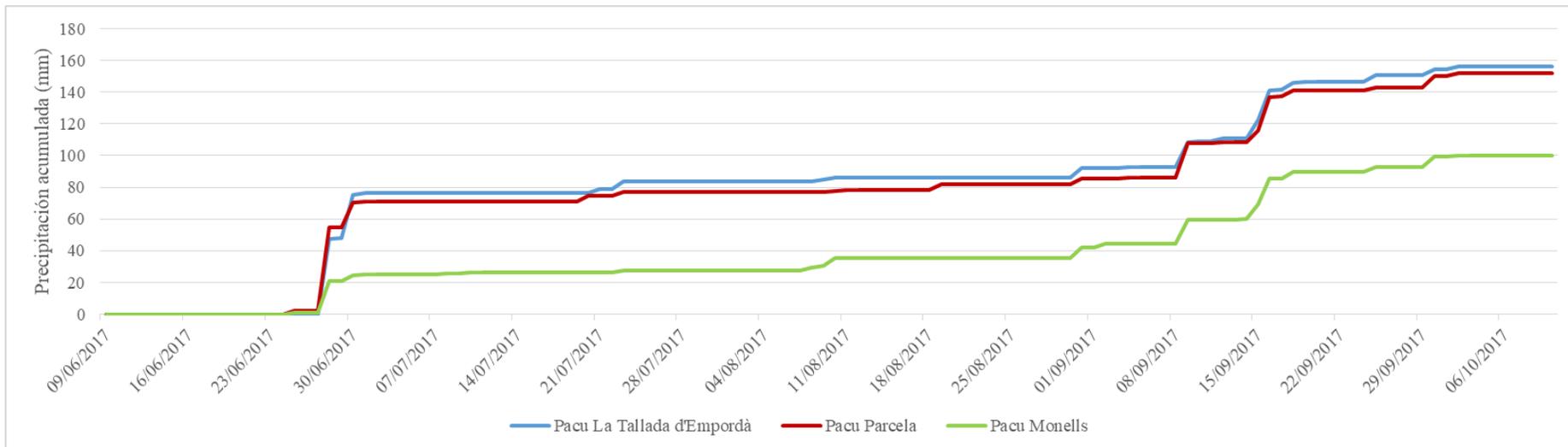


Figura 57. Precipitaciones acumuladas obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, en la parcela y Monells.

4.3.5 Evapotranspiración diaria y acumulada

En la Figura 59 se reproducen las variaciones de la evapotranspiración diaria de referencia (ET_o), siendo de promedio de 4'1 mm/día, 3'9 mm/día y 4'2 mm/día en La Tallada d'Empordà, la parcela y Monells, respectivamente. Estos valores se ajustan a los 4 – 5 mm/día que determinó FAO (2015). Los días en que los valores son inferiores coinciden en el tiempo con las precipitaciones (Figura 56). Las diferencias de ET_o de las estaciones respecto a las de la parcela fueron mínimas, con promedios de 0'2 – 0'4 mm/día (Figura 58). En la parcela la ET_o total acumulada fue de 481 mm, un 5'25% y 9'46% inferior a la de La Tallada d'Empordà y Monells, respectivamente (Figura 60). Estadísticamente el ajuste de los datos es correcto (Tabla 14), por lo que no es imprescindible la instalación de una estación climática, pero sí recomendable para obtener una evapotranspiración de referencia más precisa.

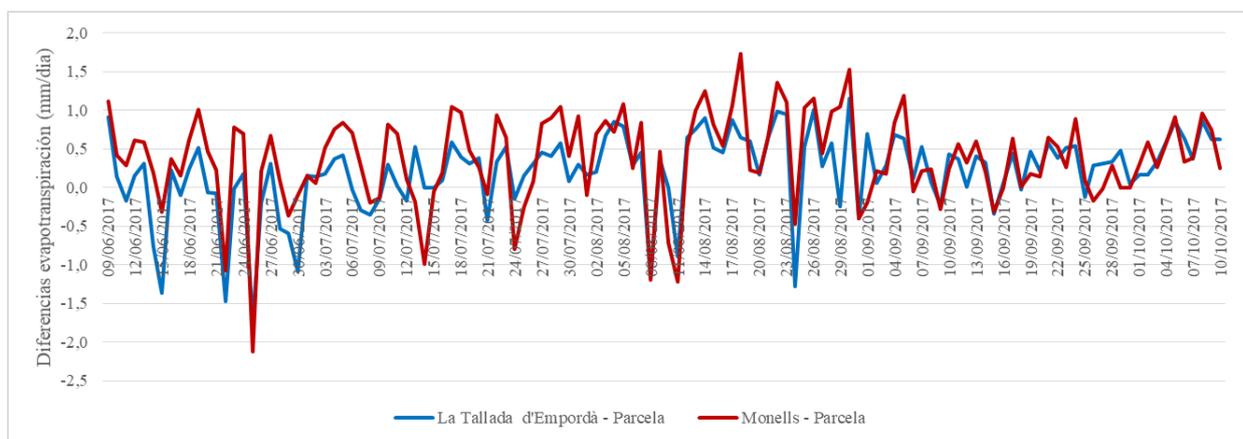


Figura 58. Diferencias de las temperaturas mínimas obtenidas entre las estaciones de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Tabla 14. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a las evapotranspiraciones diarias entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R ²	RMSE	NSE	n _t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,86	0,55	0,84	1,48	Bueno
Monells - Parcela	0,85	0,69	0,77	1,11	Aceptable

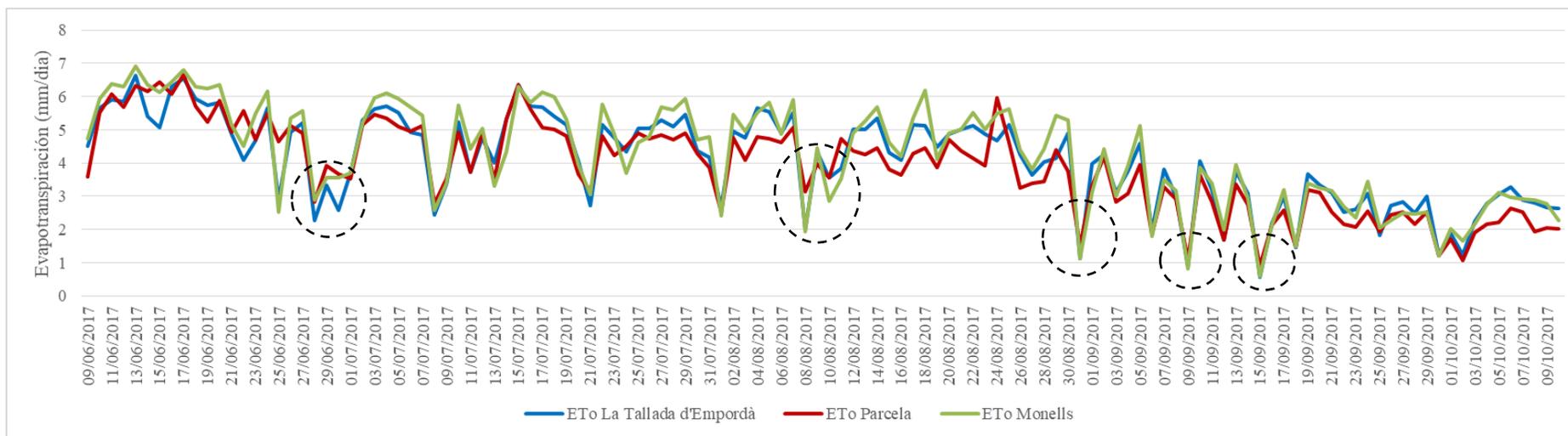


Figura 59. Evapotranspiraciones diarias obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, en la parcela y Monells.

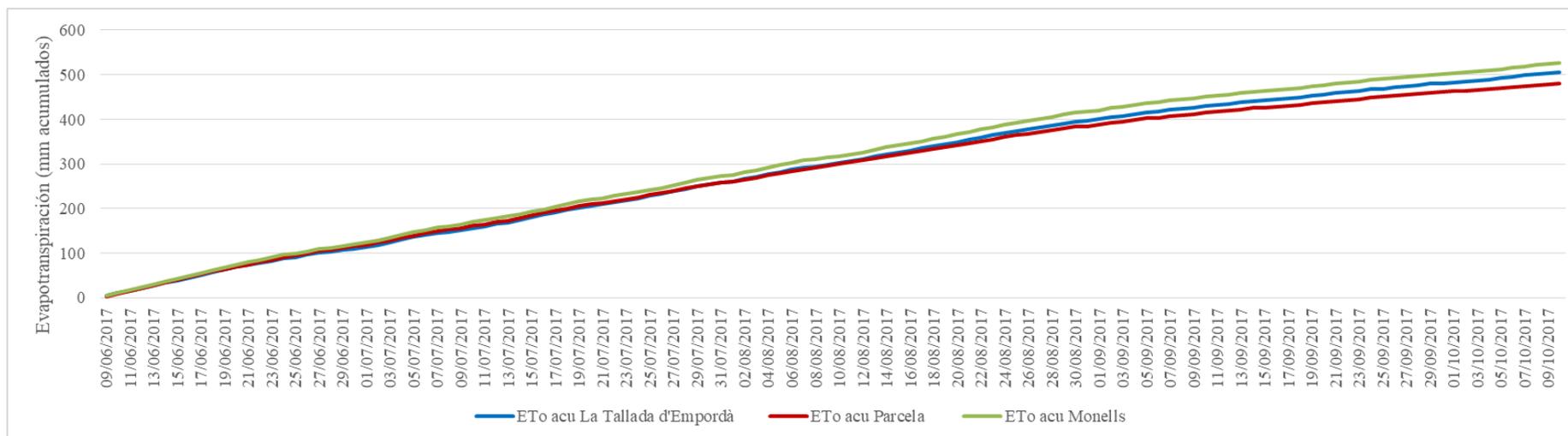


Figura 60. Evapotranspiraciones acumuladas obtenidas en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, de la parcela y Monells.

4.3.6 Grados-día y acumulados

El promedio de los grados-día (GDD) fue de 12'3°C, 12 °C y 12'7°C en La Tallada d'Empordà, la parcela y Monells, respectivamente (Figura 62). Los menores GDD se pueden vincular con los días en que la precipitación fue mayor (Figura 56). Las diferencias se representan en la Figura 61, donde se aprecia que generalmente los GDD fueron algo inferiores en la parcela, con promedios de 0'3 ± 1°C respecto La Tallada d'Empordà y de 0'7 ± 1'3°C respecto Monells. En la parcela los grados-días totales acumulados fueron de 1.363'8°C, un 2'63% inferiores a La Tallada d'Empordà y un 5'78% inferiores a Monells (Figura 63). El ajuste de los datos obtenidos en las estaciones es bueno, por lo que la instalación de una estación a pie de parcela no quedaría justificada para la determinación de los grados-día (Tabla 15).

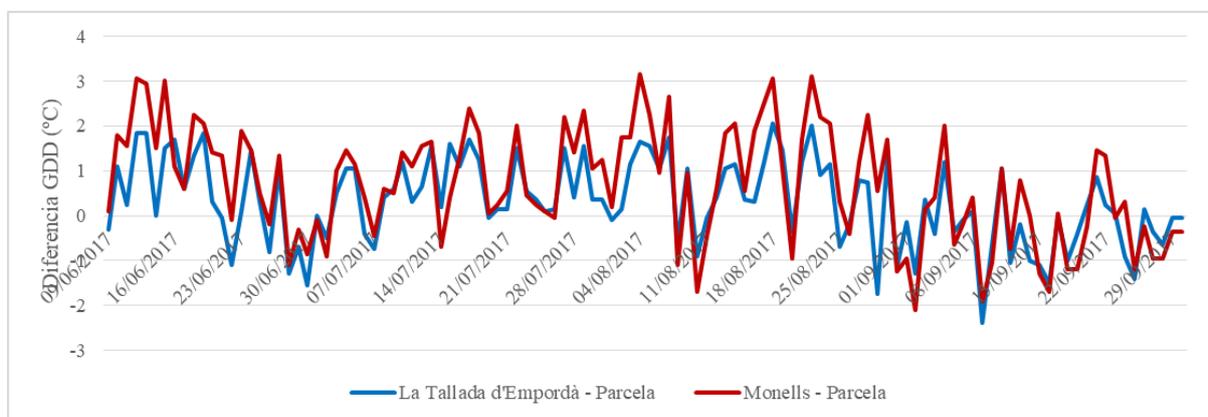


Figura 61. Diferencias de los grados-día (GDD) obtenidos entre las estaciones de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Tabla 15. Coeficientes estadísticos y ajuste referentes a los grados-día entre las de la parcela y La Tallada d'Empordà, y de la parcela y Monells.

Estación climática	R ²	RMSE	NSE	n _t	Ajuste
La Tallada d'Empordà - Parcela	0,93	1,00	0,89	2,03	Bueno
Monells - Parcela	0,90	1,43	0,80	1,23	Bueno

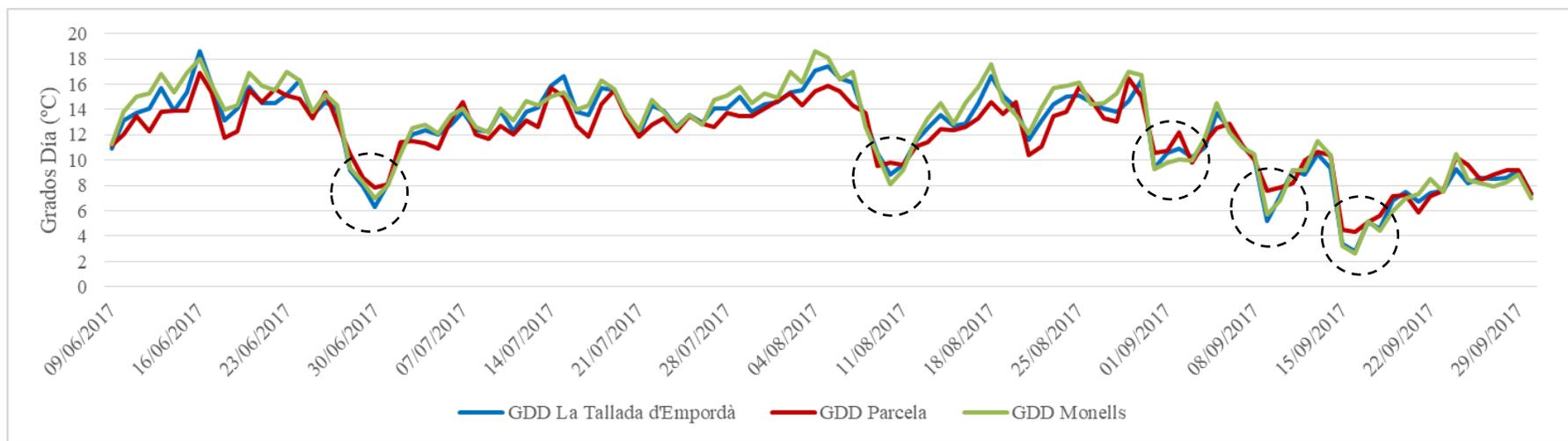


Figura 62. Grados-día (GDD) obtenidos en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, en la parcela y Monells.

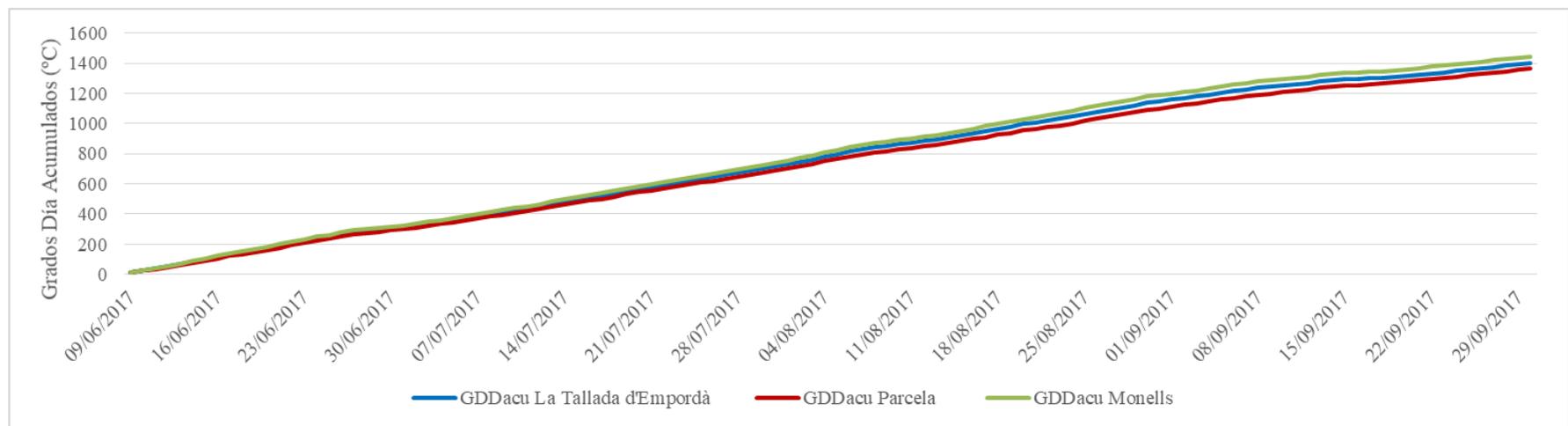


Figura 63. Grados-día (GDD) acumulados obtenidos en las estaciones climatológicas de La Tallada d'Empordà, en la parcela y Monells.

5. CONCLUSIONES

Se estructuran las conclusiones del trabajo de acuerdo con los objetivos propuestos:

1. En relación con el riego:

- a. En RIC se utilizó un volumen de agua de riego de 14.110 m³/ha, un 70% superior a los 8.297 m³/ha de RG. La evapotranspiración del cultivo fue de 687 mm, y el aporte hídrico (agua de riego más lluvia) fue un 129% y un 44% superior a las necesidades en RIC y RG, respectivamente.
- b. El contenido volumétrico de agua del suelo en RIC se mantuvo muy constante. A 15 y 45 cm estuvo en estado de saturación permanente por la existencia de la lámina de agua superficial y el alto nivel freático, pero a 30 cm no llegó a saturación, aunque sí en valores muy cercanos. En RG el suelo no llegó a saturación pero estuvo próximo, y a 15 cm las variaciones de contenido volumétrico fueron notables y se relacionan con aumentos de potencial matricial y paradas de riego.
- c. El nivel freático en RIC y RG fluctuó en el tiempo y no se ha conseguido relacionar con prácticas culturales concretas, precipitaciones u otros parámetros. Probablemente pudo haber influido el manejo del riego en las fincas colindantes.
- d. El agua del freático en RIC tuvo una CE promedio de 0'88 dS/m RG, siendo un 87% inferior a la de RG, que fue de 6'78 dS/m. Probablemente la superior dotación hídrica de RIC permitió un mayor lavado de las sales, tanto en profundidad como en superficie, puesto que el agua del desagüe tenía una CE superior casi en un 10% a la del RG. Pero se requerirían estudios más extensos para la confirmación de este supuesto, ya que la falta de datos desde el inicio del cultivo imposibilita llegar a una conclusión firme. Según Mass y Hoffman (1977) la salinidad del suelo provocó una disminución de las producciones del 4% y 19% en RIC y RG, respectivamente.
- e. Las producciones en RIC fueron un 16'5% superiores a las obtenidas en RG. Esta diferencia se observa en el peso de 1.000 granos, que fue similar a referencias existentes para la variedad Onice (RIC), con 35'2 g, pero en la variedad Baldo (RG) fue de 30 g, siendo un 25% inferior según el establecido para la variedad.
- f. La WUE, la IWUE y la E_r en RIC fueron de 0'41 kg arroz/(m³ agua riego + lluvia), 0'46 kg arroz/(m³ agua riego + lluvia) y 45'69%, siendo un 36%, un 46% y un 81%, respectivamente, inferiores que en RG. Aunque los índices se han basado

en una simplificación del balance hídrico se puede afirmar que, en términos de eficiencia hídrica, es mejor el sistema de riego por goteo.

2. En relación con el desarrollo del cultivo:

- a. Los valores máximos de LAI calculados mediante el procedimiento destructivo fueron de $27 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en RIC y $16 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en RG, muy superiores a los obtenidos en otros estudios. La difícil diferenciación entre plantas y macollas, y el alto porcentaje de ahijamiento del arroz pudo haber distorsionado estos valores al alza. Utilizando la aplicación móvil POCKET-LAI los valores se ajustaron a los de la bibliografía, con máximos de $5'1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en RIC y $3'5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en RG, pero con una correlación entre ambos conjuntos de datos muy baja (0'5) que probablemente se podría mejorar tomando las fotos de las parcelas siempre desde la misma localización.
- b. El sistema de riego no influyó significativamente en el estadio fenológico del cultivo ni en los grados-día necesarios para alcanzar cada estadio.

3. Adquisición de datos agroclimáticos:

- a. El ajuste de las temperaturas medianas, máximas y mínimas obtenidas en la estación de la parcela respecto a las dos de la XEMA más cercanas fue buena, a excepción de las temperaturas máximas con Monells que justificarían la instalación de un termómetro a pie de parcela. La menor amplitud térmica obtenida en la parcela podría ser causada por su mayor proximidad al mar, que mitigaría las temperaturas, motivo por el cual los resultados se ajustaron mejor con los de La Tallada d'Empordà que con los de Monells (que se encuentra más al interior).
- b. Las precipitaciones de la parcela se ajustaron muy bien a las obtenidas en La Tallada d'Empordà pero no con las de Monells, que fueron un 34'1% inferiores y justifican la conveniencia de instalar una estación agroclimática a pie de parcela. Hay que tener presente que al variar la lluvia en intensidad, duración y espacio es recomendable disponer de un pluviómetro en la parcela para un mayor ajuste de datos. Las precipitaciones se han relacionado con consecuentes disminuciones de temperaturas, evapotranspiración y GDD.
- c. Las evapotranspiraciones obtenidas en la estación de la parcela tuvieron un ajuste aceptable con las dos más cercanas de la XEMA, por lo que no sería imprescindible la instalación de una estación agroclimática, pero sí recomendable para obtener datos más precisos.

- d. Los grados-día de la parcela se ajustaron bien a los de La Tallada d'Empordà y Monells, haciendo prescindible la instalación de una estación a pie de parcela.

BILIOGRAFIA

- ACA. (2010). *Estimació i prognosi de la demanda d'aigua a Catalunya. Bases tècniques*.
Obtenido de https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/planificacio/disponibilitat_aigua/bases_tecniques_v3.pdf
- Akaogi, M. (2014). *What are growing degree days and how are they useful for rice grower in the northeastern USA*. Obtenido de http://www.ricenortheasternus.org/documents/GDD_Briefing_final.NE_USA_Rice.July2014.pdf
- Arao, T., Kawasaki, A., Baba, K., Mori, S., & Matsumoto, S. (2009). Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice. *Environmental Science & Technology*, 43, 9361-9367.
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Borragnán, J., & Ramírez de Catagena, F. (2011). Irrigation performance and gross water productivity in furrow-irrigated ornamental tree production. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9 (2), 627-640.
- Areola, R. O. (2014). *Manual para la Producción de Semilla de Arroz. Folleto Técnico Núm. 2*. Tecomán, Colima, México .
- Benavides, Á., & Jara, E. (2014). *Comparación de tres sistemas de riego para la producción de arroz con tres densidades de siembra en Zamorano*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana.
- Bertone Sementi. (2018). *Baldo*. Recuperado el 6 de junio de 2018, de Riso: <http://www.bertonesementi.it/ita/00start.htm>
- Blanco, O. (2014). *Agronomía del cultivo del arroz en riego por aspersion: variedades, riego, fertilización y control de malas hierbas*. Obtenido de http://digital.csic.es/bitstream/10261/99074/3/BlancoO_TD-EEAD_2014.pdf
- Bouman, B., & Tuong, T. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agricultural Water Management* (49), 11 - 30.
- Bouman, B., Castañeda, A., & Bhuiyan, S. (2002). Nitrate and pesticide contamination of groundwater under rice-based cropping systems: evidence from the Philippines. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.

- Bouman, B., Lampayan, R., & Tuong, T. (2007). *Water management in irrigated rice: coping with water scarcity*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute.
- Branson, J., Wilson, C., Norman, R., Moldenhauer, K., Gibbons, J., & Frizzell, D. (2007). Development of Degree-Day 50 thermal unit thresholds for new rice cultivars. *Rice research studies 2006*, 259 - 266.
- Campos-Taberner, M. G.-H.-R. (2016). Multitemporal Monitoring of Plant Area Index in the Valencia Rice District with PocketLAI. *Remote sensing*, 8, 12-202.
- Chang, T.-T., & Bardenas, E. A. (1965). The morphology and varietal characteristics of the rice plant. *Technical Bulletin 4*.
- CIAT. (2005). Morfología de la Planta de Arroz.
- Corominas, J. (2010). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua*, 219.
- Counce, P., Keisling, T., & Mitchell, A. (2000). A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, 40, 436 - 443.
- DARP. (2011). *Pla de regadius de Catalunya 2008 - 2020* . Obtenido de <http://agricultura.gencat.cat/ca/detalls/Article/Pla-de-regadius-de-Catalunya-2008-2020#bloc3>
- Degiovanni, V., Berríos, L., & Charry, R. (2010). Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina . *Capítulo 4. Origen, taxonomía, anatomía y morfología de la planta de arroz*.
- Diouf, J. (2007). *Afrontar la escasez de agua*. Obtenido de Entrevista con el Director-General de la FAO, Dr. Jaques Diouf: <http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2007/1000521/index.html>
- Ente Nazionale Rici. (2012). XLV Relazione annuale. *Il Risicoltore*.
- ERSAF. (2011). *Progetto Gradi Colture e Dimostrative Cerealicole*. Obtenido de http://www.ersaf.lombardia.it/upload/ersaf/perlaricerca/PGC_2011_RISO_21712_631.pdf
- Evans, J. (2017). *El Ciclo del Agua*. Obtenido de <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

- Fang, H., Li, W., Wei, S., & Jiang, C. (2014). Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NEChina: Intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digitalhemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126-141.
- FAO. (1976). Water quality for agriculture. En R. Ayers, & D. Westcot, *Irrigation and drainage paper* (pág. 29).
- FAO. (2004). *Aspectos del arroz. Para satisfacer las necesidades de alimentos de la población mundial que crece aceleradamente, los países productores de arroz tienen que abordar una serie de asuntos*. Obtenido de http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2004/36887/article_36967es.html
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Obtenido de Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- FAO. (2014a). *El arroz es la vida. Incrementar la producción sostenible de arroz: clave de la seguridad alimentaria mundial*. Obtenido de <http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2004/36887/index.html>
- FAO. (2014b). *Año Internacional del Arroz 2014. El arroz es vida. El Arroz y la Nutrición Humana*. Obtenido de <http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/hoja3.pdf>
- FAO. (2014c). *Año Internacional del Arroz 2014. El arroz es vida. El Arroz y el Agua: Una Larga Historia Matizada*. Obtenido de <http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/hoja1.pdf>
- FAO. (2015). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Estudio FAO: Riego y drenaje*, 66, 109-111.
- FAO. (2017). *Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/economic/est/publications/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>
- FAOSTAT. (2017a). *Crops*. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- FAOSTAT. (2017b). *Rice cultivation*. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/GR>

- FDA. (2018). *Arsenic in rice and rice products*. Recuperado el 22 de febrero de 2018, de <https://www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/Metals/ucm319870.htm>
- FEGA. (2018). *Sistema de identificación de parcelas agrícolas*. Obtenido de Ortofoto y parcelario superpuesto: <blob:http://sigpac.mapa.es/0d20bf69-9b97-4ad8-8f89-b72983ea7c85>
- Gleick, P. (1996). *Water resources*. In *Encyclopedia of Climate and Weather*. New York: Oxford University Press.
- Hardke, J., Wilson, C., & Norman, R. (2013). DD50 computerized rice management program. *Arkansas Rice Production Handbook*, 45 - 50.
- Hernández, F. (2018). *Inyección de Fertilizantes para Riego en Sistemas de Fertirrigación*. Obtenido de Asistencia Técnica Agrícola: http://www.agro-tecnologia-tropical.com/inyeccion_de_fertilizante.html
- Hojsak, I., Braegger, C., Bronsky, J., Campoy, C., Colomb, V., Decsi, T., y otros. (2015). *Arsenic in Rice: a cause of concern* (Vol. 60).
- Idescat. (2017a). *Superficie agrícola. Por productos. Provincias*. Obtenido de <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=444&t=2014&lang=es>
- Idescat. (2017b). *Producción agrícola. Por productos. Provincias*. Obtenido de <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=446&lang=es>
- Kirk, G. (2004). *The biochemistry of submerged soils*. Chichester, West Sussex (UK): John Wiley and Sons .
- Langreo Navarro, A. (2007). El arroz en el España y en el Mundo. Situación y perspectivas. *MERCASA. Distribución y Consumo. N° 95*.
- Li, R., Stroud, J., Ma, J., Mcgrath, S., & Zhao, F. (2009). Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization. *Environmental Science & Technology*, 43, 3778-3783.
- MAGRAMA. (2017). *Arroz*. Obtenido de <http://www.mapama.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/arroz/>

- MAPAMA. (2014). *Mapa de Arroces y cereales con Denominación de Origen Protegida e Indicación Geográfica Protegida*. Obtenido de http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/publicaciones/alimentacion/mapa_dop_arroces.aspx
- MAPAMA. (2016a). *Distribución de la superficie y producción de arroz en España por Comunidades Autónomas*. Obtenido de http://www.mapama.gob.es/es/buscador/resultados-busqueda.aspx?q=Distribuci%C3%B3n+de+la+superf%C3%ADcie+y+producci%C3%B3n+de+arroz+en+Espa%C3%B1a+por+Comunidades+Aut%C3%B3nomas&entqr=0&output=xml_no_dtd&client=default_frontend&oe=utf-8&idioma=es&ie=utf-8
- MAPAMA. (2016b). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadíos en España. 2016*. Obtenido de http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/novedades/regadios2016_tcm7-460767.pdf
- MAPAMA. (2016c). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Resultados 2016*. Obtenido de http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2016_tcm7-464052.pdf
- MAPAMA. (2016d). *Evolución de la superficie y producción de arroz en España*. Obtenido de http://www.mapama.gob.es/es/buscador/resultados-busqueda.aspx?q=Evoluci%C3%B3n+de+la+superf%C3%ADcie+y+producci%C3%B3n+de+arroz+en+Espa%C3%B1a+&entqr=0&output=xml_no_dtd&client=default_frontend&oe=utf-8&idioma=es&ie=utf-8&getfields=*&site=MARM
- Margarit, J., Muñoz, P., Usón, A., Boixadera, J., & Llop, J. (1993). *Mapa de sòls detallat (E.1:25.000) del marge esquerre del Baix Ter (Alt i Baix Empordà)*. Lleida : Draft.
- Martínez Beltrán, J. (2016). Efectos de los regadíos del Delta del Ebro sobre la calidad de sus masas de agua asociadas. *XXXIV Congreso Nacional de riegos*. Sevilla.
- Martínez, L. (1998). *Manual de Fertirrigación*. Huasco: CROMOgraf.
- Meteocat, S. M. (2015). *El clima de Catalunya*. Recuperado el 17 de mayo de 2018, de <http://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/el-clima-ahir/el-clima-de-catalunya/>

- Meteocat, S. M. (2016). *Climatologies comarcals*. Recuperado el 17 de mayo de 2018, de <http://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/el-clima-ahir/climatologia-comarcal/>
- Miller, P., Lanier, W., & Brandt, S. (2001). *Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages*. Bozeman: Montana State University.
- Moldenhauer, K., Wilson, C., Counce, P., & Hardke, J. (2013). Rice growth and development. *Arkansas Rice Production Handbook*, 9 - 20.
- Murcia, J. L. (2012). Arroz: el alimento más consumido en el mundo. *MERCASA. Distribución y consumo* (121).
- Olmos, S. (2006). *Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz*. Corrientes, Argentina.
- Orlando, F., Movedi, E., Coduto, D., Parisi, S., Brancadoro, L., Pagani, V., y otros. (2016). Estimating Leaf Area Index (LAI) in Vineyards Using the PocketLAI Smart-App. *Sensors*. 16.
- Pascual, V., & Wang, Y. (2017). *Impact of Water Management on Rice Varieties, Yield, and Water Productivity under the System of Rice Intensification in Southern Taiwan*. MPDI.
- Payero, J., Edisto Research, & Education Center. (noviembre de 2017). Introduction to Growing Degree Days. *Agronomic Crops*.
- Polón Pérez, R., Castro Alvarez, R., & Ruiz Sánchez, M. y. (2012). Práctica de diferentes alturas de corte al cultivo de rebrote y su influencia en el rendimiento del arroz (*Oryza sativa* L.) en una variedad de ciclo medio. *Cultivos Tropicales*, 33 (4), 59-62.
- Portero, M. (2011). *Producción integrada del arroz en el sur de España*. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca, Fundación Caja Rural del Sur.
- Ramulu, V., Parveen, V., Uma, M., Avil, K., & Radhika, K. (2016). *Evaluation of drip irrigation and fertigation levels in aerobic rice for higher water productivity*. 2nd World Irrigation Forum. Chiang Mai, Thailand.
- Richards, M., & Sander, B. (2014). *Alternate wetting and drying in irrigated rice*. Climate-Smart Agriculture Practice Brief. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480.
- Ruralcat. (2018). *Dades agrometeorològiques* . Obtenido de www.ruralcat.gencat.cat
- Salvador, R., Martínez-Cob, A., Cavero, J., & Playán, E. (2011). Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation system. *Agricultural Water Management* (98), 577-578.
- Sánchez-Llerena, J., López-Piñeiro, A., Albarrán, A., Peña, D., Becerra, D., & Rato-Nunes, J. (2016). Short and long-term effects of different irrigation and tillage systems on soil properties and rice productivity under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 101-110.
- Soman, P. (2012). *Drip irrigation and fertigation technology for rice cultivation*. Asian Irrigation Forum 2012. Manila, Philippines.
- Stuerz, S., Sow, A., Muller, B., Manneh, B., & Asch, F. (2014). Leaf area development in response to meristem temperature and irrigation system in lowland rice. *Field Crops Research*. 163, 74-80.
- Talukder, A., Meisner, C., Sarkar, M., & Islam, M. (2011). Effect of water management, tillage options and phosphorus status on arsenic uptake in rice. *Environmental Science & Technology*, 74, 834-839.
- Velázquez, J., Rosales, A., Rodríguez, H., & Salas, R. (2015). Determinación de las etapas de inicio de macollamiento, inicio de primordio, floración y madurez en la planta de arroz, con el sistema S, V y R correlacionado con la sumatoria térmica. *Agronomía Costarricense*. 32 (2), 121 - 129.
- Vered, E. (2017). *Comunicación personal*.
- Villalba, J., Jarma, A., & Combatt, E. (2017). Respuesta fisiológica de cultivares de arroz a diferentes épocas de siembra en Córdoba, Colombia. *Temas Agrarios*, 22, 9-19.
- Wang, Y., Zhou, L., Jia, Q., & Yu, W. (2017). Water use efficiency of a rice paddy field in Liahoe delta, Northeast China. *Agricultural Water Management*, 187, 22-231.

WEAP. (16 de mayo de 2018). *LAI Curve Point 1 [Fraction Of Growing Season]* . Obtenido de http://www.weap21.org/WebHelp/index.html#PGM_Crop_Library.htm

Xue, C., Yang, X., Bouman, B., Deng, W., Zhang, Q., Yan, W., y otros. (2007). Effects of irrigation and nitrogen on the performance of aerobic rice in northern China. *Field Crops Research*.

Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, Laguna, Filipinas .

Zhu, Y., Williams, P., & Meharg, A. (2008). *Exposure to inorganic arsenic from rice: A global issue?* *Environmental Pollution*. doi:10.1016/j.envpol.2008.03.015.