



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària
Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal

TESIS DOCTORAL

**“AGRONOMÍA DEL CULTIVO DEL ARROZ EN
RIEGO POR ASPERSIÓN:
VARIETADES, RIEGO, FERTILIZACIÓN Y
CONTROL DE MALAS HIERBAS”**



Olga Blanco Alibés

Lleida, 2014



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària
Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal

Tesis Doctoral

**“Agronomía del cultivo del arroz en
riego por aspersión: variedades, riego,
fertilización y control de malas hierbas”**

Memoria presentada por: Olga Blanco Alibés

En satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Directores:

Dr. José Cavero Campo. EEAD-CSIC.
Dr. José M^a Faci González. CITA-DGA.



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Tutor:

Dr. Jaume Lloveras Vilamanyà. UdL.



Lleida, junio de 2014



Esta tesis ha sido realizada en la Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC) del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA) y se ha desarrollado gracias a una beca Predoctoral de Formación de Investigadores (FPI) asociada al proyecto de investigación «El cultivo del arroz en sistemas de riego por inundación y por aspersión: agronomía e impacto ambiental» (AGL2000-1775-C03-01), financiado por CICYT.

“La vida sólo puede ser comprendida mirando para atrás;
mas sólo puede ser vivida mirando para adelante.”

Soren Kierkegaard

A mi familia, que siempre está ahí

A los que se han ido en este tiempo, Xavier, Pep, Linda y Carlos,
que siempre estarán en el recuerdo.

Agradecimientos

En la realización de la presente tesis han colaborado, de una manera u otra, un grupo de personas a las que considero necesario mostrar mi agradecimiento.

En primer lugar deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis: el Dr. José Cavero, del Departamento de Suelo y Agua de la EEAD-CSIC y el Dr. José M^a Faci, de la Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC) del CITA-DGA, por su confianza, por su supervisión, dedicación y los conocimientos y ánimos transmitidos, sin los cuales no habría sido posible la realización de este trabajo.

En la Universitat de Lleida, al Dr. Jaume Lloveras, tutor de esta tesis, y a Tere Estela, por todas las facilidades que me han dado.

A la Unidad de Suelos y Riegos del CITA en general; en particular, al Dr. Ramón Aragüés, por todas las facilidades dadas y no agradecidas lo suficiente, y al Dr. Antonio Royo, por su ayuda y dirección en los ensayos de variedades; a Miguel Izquierdo, Jesús Gaudó, Enrique Mayoral y Nacho Clavería por su inestimable ayuda en la realización de los trabajos de campo, Lola Naval y Tere Molina en el procesado de muestras en laboratorio, Rosa Gómez solucionando los problemas informáticos y Luis Coello los administrativos, así como a Blanca Martínez y a los estudiantes en prácticas que han colaborado en la toma de datos.

Del Departamento de Suelo y Agua de la EEAD-CSIC a Piluca Paniagua, por su ayuda en el trabajo de laboratorio y al Dr. Antonio Martínez Cob por compartir la información sobre sus ensayos de evapotranspiración en arroz.

De la Unidad de Sanidad Vegetal del CITA, especialmente al Dr. Carlos Zaragoza, a Fernando Arrieta, María León, Gabriel Pardo y Álvaro Anzalone por su amable ayuda en la ejecución de los ensayos de herbicidas y a la Dra. Alicia Cirujeda por resolver las dudas que me fueron surgiendo al redactar la presente tesis. Asimismo, mi agradecimiento a Sonsoles Fernández-Cavada del Centro de Sanidad y Certificación Vegetal del Gobierno de Aragón.

Al Laboratorio Agrario del Gobierno de Aragón y al Laboratorio de la EEAD-CSIC por facilitarme la realización de ciertos análisis.

Al CITA, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, que me ha facilitado el desarrollo de mi trabajo.

A la Cooperativa del Campo San Miguel Arcángel de Valareña por realizar la valoración del rendimiento industrial del arroz en 2001.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología que ha financiado el proyecto AGL 2000-1775-C03: "El cultivo del arroz en sistemas de riego por inundación y por aspersión: agronomía e impacto ambiental" y la beca predoctoral FPI que ha permitido el desarrollo de esta tesis.

Muy especialmente a mis compañeros de despacho y amigos del Campus de Aula Dei Farida, Daniel, Rosa, Nacho, Vicente, Rocío, Montse, Nery, Pili, Carlota, Yoli, Cris y Olga, por los buenos ratos compartidos.

A Marie e Iris por su revisión de las traducciones del resumen al inglés y catalán.

To IRRI staff, especially Dr. Bouman, that made me feel at home and learn so much along my too short stay, in which I completely dived into rice and into The Philippines.

A los revisores externos, Dr. Ramón Isla Climent y Dra. Maite Martínez Eixarch, por su exhaustiva revisión y valiosas aportaciones que han contribuido a mejorar el documento final.

A todas las personas que no han sido nombradas pero que por un motivo u otro han ayudado a llevar a cabo el presente trabajo.

"Last but not least", a mis padres Álvaro y Carmen, a Mireia, a Pasky y a mis amigas por la confianza que han tenido en mí y por tenerles siempre que les he necesitado a pesar de mis ausencias.

Resumen

El cultivo del arroz bajo riego por aspersión es una técnica agronómica totalmente desconocida en el Valle Medio del Ebro. Esta nueva técnica se presenta como una alternativa de gran interés que puede mejorar la eficiencia del uso del agua al evitar las pérdidas de agua de riego que se producen en el sistema tradicional del cultivo y permitiría a su vez su introducción en las rotaciones de las fincas de aspersión del Valle Medio del Ebro. El objetivo general de esta tesis es estudiar la viabilidad del cultivo del arroz bajo riego por aspersión en las condiciones climatológicas del Valle Medio del Ebro. Para ello se han realizado durante los años 2001 a 2004 distintos ensayos agronómicos que abarcan 1) la determinación de las variedades más adaptadas, 2) la respuesta productiva a distintas dosis de agua, 3) la respuesta productiva a la fertilización y 4) el control de malas hierbas.

En primer lugar se presentan los resultados de la respuesta productiva y adaptación al sistema de riego por aspersión de 14 variedades comerciales que se cultivan en el Valle del Ebro. Los resultados de este ensayo indicaron que las variedades de ciclo más corto fueron las que se adaptaron mejor, y que la variedad Guadiamar, ampliamente cultivada de forma tradicional en el Valle del Ebro, tuvo un buen comportamiento productivo.

En segundo lugar se presentan los resultados de la respuesta productiva de 4 variedades de arroz a un suministro variable de agua de riego por aspersión mediante la utilización de la técnica de la fuente lineal de aspersión. Los resultados mostraron una relación lineal y positiva (con altos valores de los coeficientes de determinación) entre las variables productivas y componentes del rendimiento frente al agua aplicada (riego y precipitación). La variedad Guadiamar tuvo el mejor comportamiento productivo, con rendimientos máximos de alrededor de 6 t ha^{-1} , obtenidos con dosis de riego entre 700 y 900 mm. Dosis de agua inferiores a 500 no produjeron grano de arroz.

En tercer lugar se presentan los resultados de los ensayos de dosis de abonado nitrogenado y fosfórico y de fraccionamiento del abonado nitrogenado. Se observó una influencia positiva de las mayores dosis de fertilización nitrogenada, que aumentaron la radiación interceptada, el contenido en N de las hojas y los componentes del rendimiento, obteniéndose rendimientos aceptables ($6\text{-}7 \text{ t ha}^{-1}$) con aplicaciones de 150 a $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$. En suelos con bajo contenido inicial de P se observó una respuesta positiva a la fertilización fosfórica. Aunque no se observaron diferencias significativas entre distintos tratamientos de fraccionamiento de N, los mayores rendimientos se obtuvieron con el fraccionamiento del N al 50 % entre presembrado y ahijado.

En cuarto lugar se presentan los resultados de la selectividad y eficacia de distintos tratamientos herbicidas. Los resultados pusieron de manifiesto que el control adecuado de las malas hierbas constituye el aspecto clave para viabilidad de la producción de arroz regado por aspersión. El herbicida clomazona es el único que aplicado en preemergencia a lo largo de los tres años de ensayos ha dado lugar a un control aceptable de las gramíneas. El oxadiazón aplicado en mezcla con clomazona mejoró el control de las dicotiledóneas. La pendimetalina aplicada en preemergencia con clomazona logró un buen control de las gramíneas, pero la mezcla pareció tener un efecto fitotóxico.

Los resultados obtenidos en esta tesis proporcionan las bases técnicas para el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Es una técnica de producción viable y prometedora siempre que se elija una variedad adecuada a las condiciones climatológicas y se consiga mantener un control de las malas hierbas que evite su competencia con las plantas de arroz, especialmente en la fase de emergencia y establecimiento del cultivo.

Summary

Rice cultivation using sprinkler irrigation is an agricultural technique that had never before been investigated in the context of the Middle Ebro Valley. This new technique is presented as an alternative of great interest that can improve the efficiency of water use to prevent loss of irrigation water that occurs in the traditional system of rice cultivation and in turn to allow its introduction in the crop rotations of the Middle Ebro Valley. The overall objective of this thesis is to study the feasibility of rice cultivation under sprinkler irrigation under the weather conditions in the Middle Ebro Valley. To achieve this goal several agronomic trials were performed from 2001 to 2004 including: 1) the identification of adapted cultivars, 2) the productive response to different doses of irrigation water, 3) the production response to fertilization and 4) the control of weeds.

Firstly, the results of the productive response and adaptation to the sprinkler system of 14 commercial cultivars that are widely grown in the Ebro Valley are presented. The results of this trial indicated that short cycle cultivars are the best adapted to the sprinkler irrigation cultivation and that the Guadiamar cultivar, widely and traditionally grown in the Ebro Valley has a good productive behaviour.

Secondly, the results of the productive response of 4 rice cultivars to a variable supply of water using the technique of the sprinkler line source irrigation are shown. The results showed a linear and positive relationship (with high values of the determination coefficients) between production variables and the applied water (irrigation and rainfall). The cultivar Guadiamar had the better productive performance, with maximum yields of about 6 t ha^{-1} that were achieved with irrigation doses between 700 and 900 mm. Irrigation doses below 500 mm produced no rice grain yield.

Thirdly, the results of the nitrogen and phosphorus fertilization doses and the split of nitrogen fertilization trials are presented. There was a positive influence of the higher doses of nitrogen fertilizer that increased the intercepted radiation, the N content of leaves and yield components, achieving acceptable yields of $6\text{-}7 \text{ t ha}^{-1}$ with applications of $150\text{-}200 \text{ kg N ha}^{-1}$. In soils with low initial P content, a positive response to P fertilization was observed. Although no significant differences among splitting treatments were observed, the highest yields were achieved with two 50% splits of N fertilization in presowing and tillering.

Fourth are the results of the selectivity and effectiveness of different herbicide treatments. The results showed that a good control of weeds is the key factor for the sustainability of rice production under sprinkler irrigation. The clomazone herbicide was the only one that applied in pre-emergence over the three years of testing provided an acceptable control of grasses. Oxadiazon applied together with clomazone improved the control of broad grassleaves. Pendimethalin plus clomazone applied in preemergence achieved good control of grasses, but the mixture seemed to have a phytotoxic effect.

The results in this thesis provide the technical basis for the cultivation of rice under sprinkler irrigation. It is a promising and feasible production technique when choosing an appropriate cultivar adapted to the local weather conditions and a good weed control to avoid competition with rice plants, especially in the emergence phase and crop establishment.

Resum

El conreu de l'arròs sota reg per aspersió és una tècnica agronòmica totalment desconeguda a la Vall Mitja de l'Ebre. Aquesta nova tècnica es presenta com una alternativa de gran interès que pot millorar l'eficiència de l'ús de l'aigua en evitar les pèrdues d'aigua de reg que es produeixen en el sistema tradicional del cultiu, i permetria a la vegada la introducció d'aquest conreu en les rotacions de les finques d'aspersió de la Vall Mitja de l'Ebre. L'objectiu general d'aquesta tesi és estudiar la viabilitat del cultiu de l'arròs sota reg per aspersió en les condicions climatològiques de la Vall Mitja de l'Ebre. Per aconseguir-lo s'han realitzat, entre els anys 2001 i 2004, diferents assajos agronòmics que abasten 1) la determinació de les varietats més adaptades, 2) la resposta productiva a diferents dosis d'aigua, 3) la resposta productiva a la fertilització i 4) el control de males herbes.

En primer lloc es presenten els resultats de la resposta productiva i adaptació al sistema de reg per aspersió de 14 varietats comercials que es conreen àmpliament a la Vall de l'Ebre. Els resultats d'aquest assaig van indicar que les varietats de cicle més curt van ser les que es van adaptar millor, i que la varietat Guadiamar, àmpliament conreada de forma tradicional a la Vall de l'Ebre, va tenir un bon comportament productiu.

En segon lloc es presenten els resultats de la resposta productiva de 4 varietats d'arròs a un subministrament variable d'aigua de reg per aspersió mitjançant la utilització de la tècnica de la font lineal d'aspersió. Els resultats van mostrar una relació lineal i positiva (amb alts valors dels coeficients de determinació) entre les variables productives i components del rendiment enfront de l'aigua aplicada (reg i precipitació). La varietat Guadiamar va tenir el millor comportament productiu, amb rendiments màxims al voltant de 6 t ha^{-1} , obtinguts amb dosis de reg entre 700 i 900 mm. Dosis d'aigua inferiors a 500 mm no van produir gra d'arròs.

En tercer lloc es presenten els resultats dels assajos de dosi d'adobat nitrogenat i fosfòric, i de fraccionament de l'adobat nitrogenat. Es va observar una influència positiva de les majors dosis de fertilització nitrogenada, que van augmentar la radiació interceptada, el contingut en N de les fulles i els components del rendiment, obtenint-se rendiments acceptables ($6\text{-}7 \text{ t ha}^{-1}$) amb aplicacions de 150 a $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$. En sòls amb baix contingut inicial de P es va observar una resposta positiva a la fertilització fosfòrica. Tot i que no es van observar diferències significatives entre diferents tractaments de fraccionat de N, els majors rendiments es van obtenir amb el fraccionament del N al 50% entre presembra i fillolat.

En quart lloc es presenten els resultats de la selectivitat i eficàcia de diferents tractaments herbicides. Els resultats van posar de manifest que el control adequat de les males herbes constitueix l'aspecte clau per a viabilitat de la producció d'arròs regat per aspersió. El herbicida clomazona és l'únic que aplicat en preemergència al llarg dels tres anys d'assajos ha donat lloc a un control acceptable de les gramínies. El oxadiazón aplicat en mescla amb clomazona va millorar el control de les dicotiledònies. La pendimetalina aplicada en preemergència amb clomazona va aconseguir un bon control de les gramínies, però la barreja va semblar tenir un efecte fitotòxic.

Els resultats obtinguts en aquesta tesi proporcionen les bases tècniques per al cultiu de l'arròs sota reg per aspersió. És una tècnica de producció viable i prometedora sempre que es triï una varietat adequada a les condicions climatològiques i s'aconsegueixi mantenir un control de les males herbes que eviti la seva competència amb les plantes d'arròs, especialment en la fase d'emergència i establiment del cultiu.

ÍNDICES

ÍNDICE DE MATERIAS

RESUMEN	I
SUMMARY	II
RESUM	III
ÍNDICES	V
Índice de Materias	vii
Índice de Tablas	X
Índice de Figuras	xvi
CAPÍTULO I. EL CULTIVO DEL ARROZ	1
I.1. El arroz. Importancia del cultivo.....	3
I.2. Cultivo tradicional del arroz: riego por inundación.	8
I.3. Cultivo del arroz bajo riego por aspersión.....	10
CAPÍTULO II. OBJETIVOS	13
II.1. Objetivos.	15
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y EDÁFICA	17
III.1. Introducción.	19
III.2. Clima.....	20
III.3. Suelo y agua de riego.	26
CAPÍTULO IV. COMPORTAMIENTO DE VARIEDADES DE ARROZ CULTIVADAS CON RIEGO POR ASPERSIÓN.	31
IV.1. Introducción.	33
IV.2. Material y métodos.	35
IV.2.1. Localización del ensayo.....	35
IV.2.2. Diseño experimental. Variedades.	35
IV.2.3. Prácticas culturales.	36
IV.2.4. Medidas experimentales.....	37
IV.2.5. Análisis estadístico.	38
IV.3. Resultados.....	39
IV.3.1. Desarrollo del cultivo.....	39
IV.3.2. Rendimiento y sus componentes.	42
IV.3.3. Caracteres de calidad del grano obtenidos en la recolección con minicosechadora.	49
IV.4. Discusión.....	53
IV.5. Conclusiones.....	57

CAPÍTULO V. RESPUESTA PRODUCTIVA DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN	
A DIFERENTES DOSIS DE AGUA.....	59
V.1. Introducción.....	61
V.2. Material y métodos.....	63
V.2.1. Localización de los ensayos.....	63
V.2.2. Prácticas culturales.....	63
V.2.3. Diseño experimental. Tratamientos de riego.....	65
V.2.4. Medidas experimentales.....	67
V.2.5. Análisis estadístico de los resultados de los ensayos.....	70
V.3. Resultados.....	70
V.3.1. Agua aplicada a los distintos tratamientos.....	70
V.3.2. Potencial mátrico del suelo.....	74
V.3.3. Evolución de la altura de agua almacenada en el suelo.....	77
V.3.4. Desarrollo del cultivo.....	80
V.3.5. Rendimiento, biomasa e índice de cosecha del arroz.....	85
V.3.6. Componentes del rendimiento.....	88
V.3.7. Productividad del agua aplicada.....	90
V.4. Discusión.....	92
V.5. Conclusiones.....	94
CAPÍTULO VI. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y FOSFÓRICA EN EL	
ARROZ REGADO POR ASPERSIÓN.....	95
VI.1. Introducción.....	97
VI.2. Material y métodos.....	99
VI.2.1. Localización de los ensayos.....	99
VI.2.2. Diseño experimental. Fertilización.....	99
VI.2.3. Prácticas culturales.....	101
VI.2.4. Medidas experimentales.....	102
VI.2.5. Análisis estadístico.....	104
VI.3. Resultados.....	104
VI.3.1. Ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica.....	104
VI.3.2. Efecto del fraccionamiento de N.....	122
VI.4. Discusión.....	128
VI.5. Conclusiones.....	130
CAPÍTULO VII. CONTROL DE MALAS HIERBAS EN ARROZ CULTIVADO BAJO	
RIEGO POR ASPERSIÓN.....	133
VII.1. Introducción.....	135
VII.2. Material y métodos.....	137
VII.2.1. Descripción de los ensayos.....	137
VII.2.2. Prácticas culturales.....	137
VII.2.3. Diseño experimental. Tratamientos herbicidas.....	139

VII.2.4. Medidas de selectividad, eficacia y rendimiento.	143
VII.2.5. Análisis estadístico.....	145
VII.3. Resultados.....	145
VII.3.1. Selectividad.	145
VII.3.2. Eficacia.	149
VII.3.3. Rendimiento en grano.	160
VII.4. Discusión.....	161
VII.5. Conclusiones.....	164
CAPÍTULO VIII. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES FINALES.....	165
VIII.1. Discusión general.	167
VIII.2. Conclusiones finales.....	174
CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA.....	177
Bibliografía.	179
Anejo. Lista de abreviaturas.....	191

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Tabla I.1. Nombres comunes de <i>Oryza sativa</i> L. en distintos idiomas en el mundo.	4
Tabla I.2. Consumo de arroz en distintos países en 2009.	6
Tabla I.3. Superficie cultivada de arroz y producción de arroz cáscara en 2009 en España por Comunidades Autónomas (CC.AA.) y por subespecies.	7

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y EDÁFICA.

Tabla III.1. Localización de los ensayos.	19
Tabla III.2. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2001.	21
Tabla III.3. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2002.	21
Tabla III.4. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2003.	21
Tabla III.5. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2004.	21
Tabla III.6. Caracterización edáfica de la Parcela 1. Ensayo de variedades, campaña 2001.	26
Tabla III.7. Caracterización edáfica de la Parcela 2. Ensayo de dosis de riego campaña 2001.	26
Tabla III.8. Caracterización edáfica de la Parcela 3. Ensayos campañas 2002 (dosis de riego, fertilización y control de malas hierbas) y 2003 (fertilización y control de malas hierbas).	26
Tabla III.9. Caracterización edáfica de la Parcela 4. Ensayos campaña 2004 (dosis de agua, fertilización y control de malas hierbas).	27
Tabla III.10. Valores volumétricos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) de las parcelas experimentales.	28
Tabla III.11. Valores máximos, medios y mínimos de conductividad eléctrica (CE_a) y contenido en NO_3^- del agua de riego de las acequias Urdana y Camarera, en las campañas de riego de 2001 a 2004.	28

CAPÍTULO IV. COMPORTAMIENTO DE VARIEDADES DE ARROZ CULTIVADAS CON RIEGO POR ASPERSIÓN.

Tabla IV.1. Tipo de grano, subespecie y peso de mil semillas de las variedades del ensayo, agrupadas según el tipo de grano.	36
Tabla IV.2. Valores medios de la densidad de plantas el 5 de junio de 2001 (19 días tras la siembra) y número de días desde siembra a espigado.	39
Tabla IV.3. Biomasa aérea de cada una de las variedades en las fases de ahijado y en cosecha.	41
Tabla IV.4. Rendimiento en grano e índice de cosecha (IC) según la variedad.	43

Tabla IV.5. Densidad de panículas, número total de granos por panícula, número potencial de granos por m ² , porcentaje de granos vacíos y peso de mil granos (PMG).	45
Tabla IV.6. Relación entre el tipo de grano y el rendimiento en grano (kg ha ⁻¹) referido al 14% de humedad y los componentes del rendimiento.	48
Tabla IV.7. Peso de mil granos (PMG), peso del hectolitro (PHL), porcentaje de peso de grano según su calibre y rendimiento industrial del grano recolectado con cosechadora.	49
CAPÍTULO V. RESPUESTA PRODUCTIVA DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN A DIFERENTES DOSIS DE AGUA.	
Tabla V.1. Producción media de grano de arroz en distintos lugares del mundo.	62
Tabla V.2. Variedades estudiadas en los tres años de ensayo.	63
Tabla V.3. Fechas en que se realizaron la siembra, cosecha y fertilización en los tres años de ensayo.....	65
Tabla V.4. Valores estacionales medios del riego aplicado en los distintos tratamientos en las campañas 2001, 2002 y 2004. En los valores estacionales están incluidos los riegos iniciales de establecimiento del cultivo.....	72
Tabla V.5. Valores mensuales medios del potencial mátrico del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en la variedad Guadiamar en 2002.	76
Tabla V.6. Valores mensuales medios del potencial mátrico a 15 y 30 cm de profundidad en la variedad Guadiamar en 2004.	77
Tabla V.7. Valores mensuales medios del potencial mátrico a 15 y 30 cm de profundidad en la variedad Loto en 2004.....	77
Tabla V.8. Valores medios mensuales de la altura de agua retenida en el perfil del suelo de 0 a 60 cm en las parcelas de las variedades Gladio y Guadiamar en la campaña de 2002.	78
Tabla V.9. Valores medios mensuales de la altura de agua retenida en el perfil del suelo de 0 a 60 cm en las parcelas de las variedades Guadiamar y Loto en la campaña de 2004.....	78
Tabla V.10. Humedad gravimétrica del suelo al inicio de los ensayos de la fuente lineal de aspersión en las campañas de 2002 y 2004.....	79
Tabla V.11. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en noviembre de 2001.....	79
Tabla V.12. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en noviembre de 2002.	80
Tabla V.13. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en octubre de 2004.	80

Tabla V.14. Densidad de plantas nacidas, medida 6 semanas después de la siembra en las distintas variedades y años de ensayo con la fuente lineal de aspersión.	80
Tabla V.15. Ecuaciones de regresión entre la altura de la planta una vez alcanzado el pleno desarrollo (cm) y la dosis de agua aplicada en riego y precipitación (mm).	81
Tabla V.16. Relación entre el valor del PAR interceptado (IPAR, %) y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).	85
Tabla V.17. Parámetros de la regresión lineal entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}), la producción de biomasa aérea (kg ha^{-1}) y el índice de cosecha y la dosis de agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr, mm).	88
Tabla V.18. Parámetros de la regresión lineal entre los componentes del rendimiento (densidad de panículas (N ^o P) y peso de mil granos (PMG)) y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).	90
Tabla V.19. Productividad del agua aplicada (riego y precipitación estacional).	90
Tabla V.20. Parámetros de la regresión lineal entre la productividad del agua (kg m^{-3}) y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).	92
CAPÍTULO VI. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y FOSFÓRICA EN EL ARROZ REGADO POR ASPERSIÓN.	
Tabla VI.1. Interpretación del análisis de P Olsen en el suelo en función de la textura para cultivos extensivos (López Ritas y López Melida, 1978).	98
Tabla VI.2. Tratamientos de fertilización nitrogenada y fosfórica en los tres años de ensayo.	100
Tabla VI.3. Tratamientos en el ensayo de fraccionado del N en los tres años de ensayo, en fondo, a inicio del ahijado del arroz (Cobertera 1) y a inicio de formación de la panícula del arroz (Cobertera 2).	101
Tabla VI.4. Valores medios del rendimiento, biomasa e índice de cosecha del arroz con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.	104
Tabla VI.5. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P en el rendimiento, la biomasa aérea y el índice de cosecha en los años 2002, 2003 y 2004.	105
Tabla VI.6. Valores medios de la densidad de panículas, PHL y PMG con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.	107
Tabla VI.7. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P en los componentes del rendimiento: densidad de panículas, PMG y PHL en los años 2002, 2003 y 2004.	107
Tabla VI.8. Valores medios de la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el arroz en floración con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas.	108

Tabla VI.9. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P (kg ha^{-1}) en la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR, %)	108
Tabla VI.10. Valores óptimos y de deficiencia del contenido en nutrientes de arroz (Dobermann y Fairhurst, 2000).	110
Tabla VI.11. Valores medios del contenido en nutrientes de hojas en distintos momentos fenológicos en el ensayo de fertilización en 2002.	110
Tabla VI.12. Valores medios del contenido en nutrientes de hojas en distintos momentos fenológicos en los ensayos de fertilización en 2003 y 2004.	111
Tabla VI.13. Relación entre el contenido de N (%) en hoja de arroz en distintos momentos fenológicos y la dosis de N y de P (kg ha^{-1}) en 2002, 2003 y 2004.	112
Tabla VI.14. Relación entre el contenido de P (%) en hoja de arroz en distintos momentos fenológicos y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	112
Tabla VI.15. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz, en inicio de ahijado, y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	113
Tabla VI.16. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz en pleno ahijado y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002 y 2003.	114
Tabla VI.17. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz en floración y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	115
Tabla VI.18. Valores medios del contenido en nutrientes del grano y de la paja en los ensayos de fertilización en 2002, 2003 y 2004.	116
Tabla VI.19. Relación entre el contenido de N y P (%) en el grano y la paja de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	117
Tabla VI.20. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en el grano de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	118
Tabla VI.21. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en la paja de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.	119
Tabla VI.22. Contenido de nitratos y amonio del suelo al inicio de los ensayos en las campañas de 2002, 2003 y 2004.	119
Tabla VI.23. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2002.	121
Tabla VI.24. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2003.	121
Tabla VI.25. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2004.	121

Tabla VI.26. Balance de N en el suelo de 0 a 90 cm de profundidad en las 3 campañas en el ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica.	122
Tabla VI.27. Rendimiento, biomasa e índice de cosecha (IC) del arroz en los distintos tratamientos de fraccionado de nitrógeno aplicados en los años 2002, 2003 y 2004.....	122
Tabla VI.28. Valores medios de la densidad de panículas, PHL y PMG en los distintos tratamientos de fraccionado de nitrógeno aplicados en los años 2002, 2003 y 2004.	123
Tabla VI.29. Radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el arroz en floración en los ensayos de fraccionamiento de N.....	123
Tabla VI.30. Contenido de N en plantas de arroz muestreadas a lo largo de las tres campañas en los ensayos de fraccionamiento de N.	124
Tabla VI.31. Valores medios del contenido en P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn de hojas muestreadas a lo largo de las tres campañas en el ensayo de fraccionamiento de N.....	125
Tabla VI.32. Valores medios del contenido en P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn del grano y la paja en cosecha en las distintas campañas del ensayo de fraccionamiento de N.	126
Tabla VI.33. Balance de N en el suelo de 0 a 90 cm de profundidad en las 3 campañas en el ensayo de fraccionado de N.	128
CAPÍTULO VII. CONTROL DE MALAS HIERBAS EN ARROZ CULTIVADO BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN.	
Tabla VII.1. Fechas en que se realizaron la siembra, cosecha y fertilización en los tres años de ensayo.....	138
Tabla VII.2. Características del calendario de riego aplicado en los tres años de estudio.	139
Tabla VII.3. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2002.....	140
Tabla VII.4. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2003.....	140
Tabla VII.5. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2004.....	141
Tabla VII.6. Fechas en que se realizaron los tratamientos de preemergencia, postemergencia precoz y postemergencia tardía en los tres años de ensayo.	142
Tabla VII.7. Fecha de las distintas valoraciones de selectividad y eficacia efectuadas a lo largo de las 3 campañas de ensayos en semanas tras la siembra (STS).....	144
Tabla VII.8. Descripción de la escala de valoración visual de la fitotoxicidad.....	144
Tabla VII.9. Descripción de la escala de valoración visual de la eficacia (adaptado de EWRC, en Australian Weeds Committee, 1979).	145
Tabla VII.10. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2002, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia	

precoz (POST1), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.....	147
Tabla VII.11. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2003, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.....	148
Tabla VII.12. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2004, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.....	149
Tabla VII.13. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y <i>Cyperus rotundus</i> (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1) y tardía (POST2), valoración visual de la eficacia un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2002.....	154
Tabla VII.14. Densidad de las principales malas hierbas (<i>Echinochloa crus-galli</i> , <i>Setaria pumila</i> , <i>Anagallis arvensis</i> y <i>Sonchus oleraceus</i>) en el ensayo de 2002, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1) y tardía (POST2).	155
Tabla VII.15. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y <i>Cyperus rotundus</i> (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2), valoración visual de la eficacia un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2003.....	156
Tabla VII.16. Densidad de las principales malas hierbas (<i>Echinochloa crus-galli</i> , <i>Amaranthus blitoides</i> , <i>Anagallis arvensis</i> y <i>Sonchus oleraceus</i>) en el ensayo de 2003, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2).....	157
Tabla VII.17. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y <i>Cyperus rotundus</i> (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE) y postemergencia precoz (POST1), valoración visual de la eficacia tras los tratamientos de postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2004.....	158
Tabla VII.18. Densidad de las principales malas hierbas (<i>Echinochloa crus-galli</i> , <i>Atriplex hastata</i> , <i>Coronopus procumbens</i> y <i>Sonchus oleraceus</i>) en el ensayo de 2004, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1).....	159
Tabla VII.19. Análisis de regresión entre el rendimiento en grano del arroz y el control de malas hierbas y la fitotoxicidad en cosecha.	161

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Figura I.1. a) Dios del arroz de la cultura de los indígenas Ifugao, en Luzón, Filipinas. b) Terrazas de arroz de los Ifugao, de 2.000 años de antigüedad, declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en Batad, cordillera del norte de Luzón, Filipinas.	3
Figura I.2. Producción, superficie cultivada y rendimiento medio en grano de arroz cáscara por regiones geográficas, en 2011.....	5
Figura I.3. Evolución de la producción de arroz cáscara y la superficie cultivada de arroz en España.	6
Figura I.4. Evolución del rendimiento en grano en España y diversos países productores de arroz.	7

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y EDÁFICA.

Figura III.1. Valores medios mensuales de la precipitación en los años 2001, 2002, 2003, 2004 y en el año medio correspondiente al registro de 1990 a 2009 en la estación meteorológica de Aula Dei en Montañana (Zaragoza).....	22
Figura III.2. Valores medios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas del aire en los años 2001, 2002, 2003, 2004 y en el año medio correspondiente al registro de 1990 a 2009 en la estación meteorológica del CITA en Montañana (Zaragoza).	23
Figura III.3. Radiación solar diaria a lo largo de los años 2001 a 2004.	24
Figura III.4. Humedad relativa del aire máxima y mínima diaria en los años 2001 a 2004.	25
Figura III.5. Evolución de la conductividad eléctrica (CE_a) y del contenido en $N-NO_3^-$ del agua de riego de las acequias Urdana y Camarera, en las campañas de riego de 2001 a 2004.....	29

CAPÍTULO IV. COMPORTAMIENTO DE VARIEDADES DE ARROZ CULTIVADAS CON RIEGO POR ASPERSIÓN.

Figura IV.1. Imágenes de la sembradora de ensayos tipo Øyjord (Wintersteiger, Ried, Austria).....	36
Figura IV.2. Valores diarios de la temperatura mínima y fecha de espigado (X) de las distintas variedades en la campaña de 2001.	41
Figura IV.3. Relación entre la biomasa aérea en ahijado y el número de días de siembra a espigado.....	42
Figura IV.4. Relación entre el rendimiento en grano y el número de días desde siembra a espigado.	43
Figura IV.5. Relación entre el rendimiento en grano y el índice de cosecha (IC).....	44
Figura IV.6. Relación entre el porcentaje de granos vacíos por panícula y el número de días desde siembra a espigado.	46
Figura IV.7. Relación entre el rendimiento en grano y el total de granos formados por panícula.	47

Figura IV.8. Relación entre el rendimiento en grano y el porcentaje de granos vacíos por panícula.	47
Figura IV.9. Relación entre el rendimiento en grano y el peso de mil granos de la muestra de 40 panículas.	48
Figura IV.10. Relación entre los pesos de mil granos (PMG) de la cosecha mecánica con cosechadora y los de los muestreos manuales de 40 panículas el 28 de octubre de 2001.	50
Figura IV.11. Relación entre el PHL del grano y el número de días de siembra a espigado.	51
Figura IV.12. Dimensiones (longitud y anchura) de los granos de las variedades ensayadas.	52
Figura IV.13. Relación entre el rendimiento en grano y el ratio longitud:anchura del grano.	52
Figura IV.14. Relación entre el rendimiento industrial y la longitud del grano de arroz.....	53
CAPÍTULO V. RESPUESTA PRODUCTIVA DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN A DIFERENTES DOSIS DE AGUA.	
Figura V.1. Croquis del ensayo en las campañas 2001, 2002 y 2004.	64
Figura V.2. Croquis detallado de una repetición del ensayo de fuente lineal de aspersión en una variedad. Fotografía de la fuente lineal de aspersión en 2001.	67
Figura V.3. Tubos de acceso para la medida de la humedad del suelo con la sonda FDR Diviner 2000 en el año 2002, en la variedad Guadamar.	68
Figura V.4. Recolección manual de la biomasa aérea. a) Recolección del tratamiento menos regado (T7). b) Recolección de un tratamiento intermedio (T4).....	69
Figura V.5. Dosis estacionales de riego aplicadas en los distintos tratamientos (T1 a T7) en 2001.....	71
Figura V.6. Dosis estacionales de riego (mm) aplicadas en los distintos tratamientos (T1 a T7) en las campañas 2002 y 2004	71
Figura V.7. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2001.	73
Figura V.8. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2002.	73
Figura V.9. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2004.	74
Figura V.10. Potencial mátrico del suelo para los distintos tratamientos de riego, a 30 y 60 cm de profundidad a ambos lados de la fuente lineal de aspersión (oeste y este), en cuatro fechas en agosto y septiembre de 2001.....	75
Figura V.11. Sistema radicular del arroz regado por aspersión.	75
Figura V.12. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2001 de las variedades Balilla x Sollana, Gladio y Guadamar en los distintos tratamientos de riego.	82

Figura V.13. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2002 de las variedades Gladio y Guadiamar en los distintos tratamientos.....	83
Figura V.14. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2004 de las variedades Guadiamar y Loto en los distintos tratamientos.	83
Figura V.15. Relación entre a) la altura final de las plantas y b) la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) con el agua aplicada (riego más precipitación (R+Pr)) en las variedades ensayadas en las tres campañas estudiadas.	84
Figura V.16. a) Rendimiento en grano (14% de humedad), b) biomasa aérea y c) índice de cosecha de las distintas variedades en función del agua aplicada (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.....	86
Figura V.17. Relación entre a) la densidad de panículas y b) el peso de mil granos de las distintas variedades con el agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.	89
Figura V.18. Relación entre la productividad del agua de las distintas variedades y el agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.....	91
CAPÍTULO VI. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y FOSFÓRICA EN EL ARROZ REGADO POR ASPERSIÓN.	
Figura VI.1. Vista general del ensayo de fertilización. Campaña 2004.....	99
Figura VI.2. Efecto de la dosis de N y P en el rendimiento del arroz en los años 2002, 2003 y 2004.....	105
Figura VI.3. Efecto de la dosis de N y P en la biomasa del arroz en los años 2002, 2003 y 2004.	106
Figura VI.4. Relación entre el N aplicado y la radiación fotosintéticamente activa interceptada en la fase de floración del arroz en los años 2002, 2003 y 2004.....	108
Figura VI.5. Relación entre el rendimiento en grano para las distintas dosis de N en los años 2003 y 2004 y la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el arroz.	109
Figura VI.6. Contenido de nitrato y amonio del suelo a distintas profundidades en presiembra y al final del ensayo de fertilización (N y P) según las dosis de N (kg ha^{-1}) aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.....	120
Figura VI.7. Contenido de nitrato y amonio del suelo a diferentes profundidades en presiembra y al final del ensayo en los tratamientos de fraccionado del N en los años 2002, 2003 y 2004.....	127
CAPÍTULO VII. CONTROL DE MALAS HIERBAS EN ARROZ CULTIVADO BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN.	
Figura VII.1. Recolección del grano con microcosechadora de ensayos.....	138
Figura VII.2. Equipo empleado para la aplicación de los tratamientos herbicidas.	141
Figura VII.3. Blanqueamiento en hojas de arroz producido por el herbicida clomazona.	146

CAPÍTULO I.

EL CULTIVO DEL ARROZ

I.1. EL ARROZ. IMPORTANCIA DEL CULTIVO.

El arroz es el eje en torno al cual gira la economía de muchos países, no sólo como alimento (constituye la base de la dieta de casi la mitad de los habitantes del mundo) sino como parte de la cultura y la religión (Figura I.1). Es de especial relevancia en Asia, dónde es el alimento principal que junto con la soja hizo desarrollarse a las civilizaciones orientales, existiendo referencias de su cultivo desde hace casi 10.000 años (Hamilton, 2004). En países como Bangladesh, Camboya, Indonesia, Laos, Myanmar, Tailandia y Vietnam, el arroz proporciona un 50-80% del total de calorías consumidas por su población.



Figura I.1. a) Dios del arroz de la cultura de los indígenas Ifugao, en Luzón, Filipinas. b) Terrazas de arroz de los Ifugao, de 2.000 años de antigüedad, declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en Batad, cordillera del norte de Luzón, Filipinas.

El arroz, planta monocotiledónea del género *Oryza*, comprende 23 especies de las cuales se cultivan dos, *Oryza sativa* L., originaria del trópico húmedo de Asia y *Oryza glaberrima* Steud, originaria de África Occidental. A ellas pertenecen las más de 2.000 variedades cultivadas en todo los continentes, a excepción del Antártico, y en todo tipo de condiciones climáticas y edáficas (FAO, 2004), lo que se aprecia en el gran número de palabras que existen para denominar al arroz en el mundo (Tabla I.1). Se pueden encontrar desde variedades que se cultivan a más de 2.600 m de altura, en el Himalaya, hasta variedades que se producen bajo dos metros de agua, en el delta del Mekong (FAO, 2005).

Tabla I.1. Nombres comunes de *Oryza sativa* L. en distintos idiomas en el mundo.

Idioma	Nombre común	Idioma	Nombre común
Alemán:	reis	Hindi:	chawal, dhan, shali
Castellano:	arroz	Indonesio:	padi
Catalán:	arros	Inglés:	rice
Chino:	cau, dao, kao, ku, tao	Italiano:	riso
Coreano:	byeo	Malayo:	paddy
Euskera:	arroza	Portugués:	arroz
Francés:	riz	Vietnamita:	lúa, lúa gao
Gallego:	arroz	Otros:	arishi, arishi Arruz, kome, kumi, oruza, rais, raisi, vrihi

Los orígenes del arroz no se han podido establecer con precisión, pero parece ser que el arroz africano (*O. glaberrima*), cuyo centro de diferenciación estuvo situado en el delta del río Níger, empezó a cultivarse hace más de 3.500 años. El arroz asiático (*O. sativa*) es el más extendido y se domesticó hace más de 6.000 años en las laderas meridionales del Himalaya. Las variedades utilizadas en la presente tesis pertenecen a esta especie. El arroz asiático ha evolucionado en tres subespecies ecogeográficas:

- **Índica**, originaria de India, es la más antigua, presenta un grano largo y cristalino. De esta subespecie derivan Alena, Basmati, Clavel, Doña-na, Gladio, Puntal y Thaibonnet, entre otras variedades de grano largo, preferidas en el norte de Europa por su mayor contacto con países productores de este tipo de arroz.
- **Japónica**, originaria de China, más adecuada a zonas templadas y caracterizada por un grano corto, redondo y perlado. De esta subespecie derivan muchas de las variedades cultivadas durante siglos en España. Destacan entre ellas: Bahía, Bomba, Delta, Fonsa, Ganao, Guadiamar, Guara, Lido, Loto, Puebla, Puntal, Senia, Susan, Thainato y Ullal.
- **Javánica**, con grano largo y ancho, cultivada en el área de Indonesia, pero casi desconocida en España.

Existen más de 2.000 variedades de arroz cultivadas en el mundo, aunque en el banco de germoplasma del IRRI en Filipinas se conservan alrededor de 83.000 variedades. Las diferencias varietales (UNCTAD, 2006) se refieren a morfología de la planta y del grano, calidad del grano, resistencia al encamado, precocidad, ahijado, resistencia y tolerancia a los factores bióticos (malas hierbas, plagas y enfermedades) y abióticos (frío, sequía, acidez del suelo, carencias en elementos minerales, etc.) y productividad o rendimiento en grano.

El ciclo de la planta de arroz puede variar de 3 a 6 meses, dependiendo de la variedad y del ambiente en el que se desarrolla. Según la duración del ciclo se distinguen variedades de ciclo corto, medio y largo. Aunque tolera condiciones extremas, su cultivo es más favorable en zonas muy calurosas y húmedas.

Las temperaturas de germinación son: mínima: 10-12°C, óptima: 28-30°C, máxima: 40-45°C.

En el año 2011 se produjeron en el mundo 723 millones de toneladas de arroz (FAOSTAT data, 2012), cultivándose en al menos 114 países, de los cuales el 90% son asiáticos (Figura I.2). Los 10 mayores productores de arroz son, por orden de importancia: China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Tailandia, Birmania, Filipinas, Brasil y Camboya.

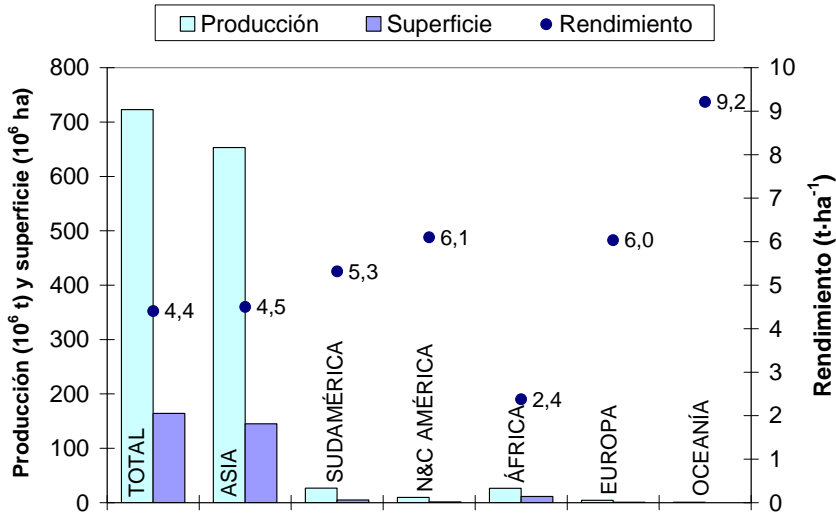


Figura I.2. Producción, superficie cultivada y rendimiento medio en grano de arroz cáscara por regiones geográficas, en 2011. Fuente: FAOSTAT data, 2012.

La superficie mundial cultivada ha ascendido entre 1961 y 2011 de 115,5 a 164 millones de hectáreas, mientras que la producción casi se ha triplicado en ese tiempo, con unos rendimientos variables entre 2 y 9 t ha⁻¹, correspondiendo los peores rendimientos a África (FAOSTAT data, 2012). Los valores máximos del rendimiento medio de arroz se obtienen en Oceanía, América del Norte y Europa.

Es de destacar el menor consumo de arroz por habitante de los países europeos frente a los asiáticos, siendo en estos últimos el arroz la mayor fuente de proteína (Tabla I.2). En España, en el año 2009 se consumieron más de 525 mil toneladas de arroz molido, con una media de 11,5 kg persona⁻¹ año⁻¹. Este valor es muy inferior a los consumos de arroz en Filipinas, China e India que superan los 68 kg de arroz molido por persona y año.

A pesar de estas cifras tan elevadas, tan sólo un 6-7% del arroz producido en el mundo es objeto de importación-exportación en el mercado internacional, destinándose alrededor de la mitad de la producción para consumo familiar y la otra mitad para la venta en mercados locales. Sin embargo, el aumen-

to del consumo de arroz que se prevé a medio y largo plazo (IRRI, 1993) tenderá a aumentar estas cifras de intercambio.

Tabla I.2. Consumo de arroz en distintos países en 2009.

País	Consumo de arroz (kg persona ⁻¹ año ⁻¹)		País	Consumo de arroz (kg persona ⁻¹ año ⁻¹)	
	Molido	Cáscara		Molido	Cáscara
Filipinas	123,3	184,9	Brasil	34,6	51,9
China	76,3	114,5	Nigeria	20,9	31,3
India	68,2	102,3	Portugal	14,8	22,2
Japón	54,0	80,9	España	11,5	17,3
Egipto	38,6	57,9	Italia	5,9	8,8

Fuente: FAOSTAT data, 2012. Estimación FAO.

En España, en 2011 la superficie cultivada de arroz fue de 121.700 ha, con una producción total de arroz cáscara de 929.900 t (un cuarto de la europea), lo que da un rendimiento medio de 7,64 t ha⁻¹. Hay que destacar la evolución paralela de la superficie y la producción total de arroz en España. Tanto la superficie como la producción de arroz en España prácticamente se han duplicado desde el año 1961 hasta el año 2012 (Figura I.3).

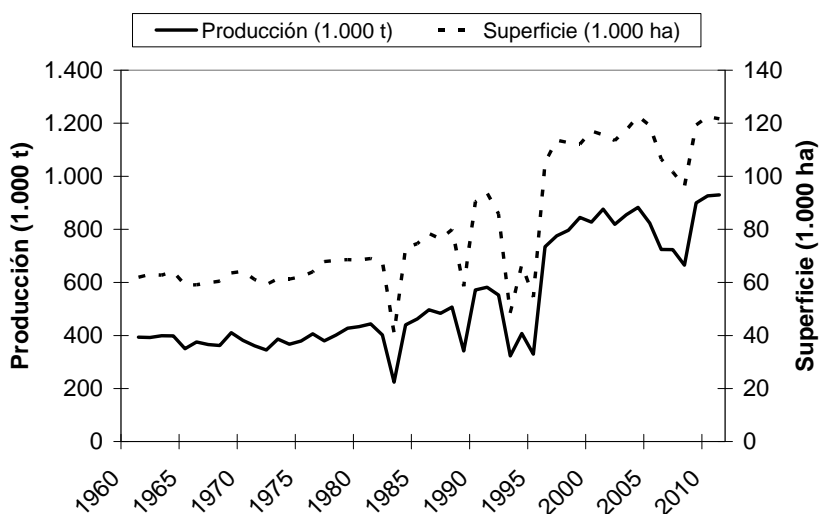


Figura I.3. Evolución de la producción de arroz cáscara y la superficie cultivada de arroz en España. Fuente: FAOSTAT data, 2012.

Analizando los datos por Comunidades Autónomas, la de mayor superficie y producción es Andalucía (31% y 35% del total, respectivamente) (Tabla I.3), seguida de Extremadura y Cataluña. En todas las Comunidades, a excepción de Cataluña y Aragón, hay una marcada preferencia por las variedades de grano largo (Índica), representando el 62% de la superficie total cultivada.

Tabla I.3. Superficie cultivada de arroz y producción de arroz cáscara en 2009 en España por Comunidades Autónomas (CC.AA.) y por subespecies.

CC.AA.	Superficie (ha)			Producción (t)		
	Indica	Japónica	Total	Indica	Japónica	Total
Andalucía	32.539	5.044	37.583	284.890	41.719	326.609
Aragón	-	12.734	12.734	-	79.817	79.817
Baleares	-	44	44	-	154	154
Castilla-La Mancha	126	-	126	819	-	819
Cataluña	1.571	19.844	21.415	10.157	132.087	142.244
Extremadura	22.508	7.108	29.616	169.229	55.230	224.459
R. de Murcia	398	-	398	1.664	-	1.664
Navarra	2.143	-	2.143	15.907	-	15.907
C. Valenciana	15.224	-	15.224	118.246	-	118.246
ESPAÑA	74.509	44.774	119.283	600.913	308.853	909.766

Fuente: Anuario de Estadística Agroalimentaria, 2009 (MARM, 2010).

Los rendimientos en grano obtenidos en España son cercanos a los cosechados en zonas de clima templado, como Italia y EE.UU., aunque algo inferiores a los obtenidos en Australia, donde también se cultiva en zonas de clima templado, de lo que se deduce que todavía no se ha alcanzado el rendimiento potencial. Asia, con la mayor producción de arroz, presenta una gran variabilidad en cuanto a rendimientos, debida a la gran variabilidad de las condiciones climáticas y edáficas locales, cuyos mayores productores, China e India obtuvieron en 2011 6,7 y 3,5 t ha⁻¹ respectivamente (Figura I.4).

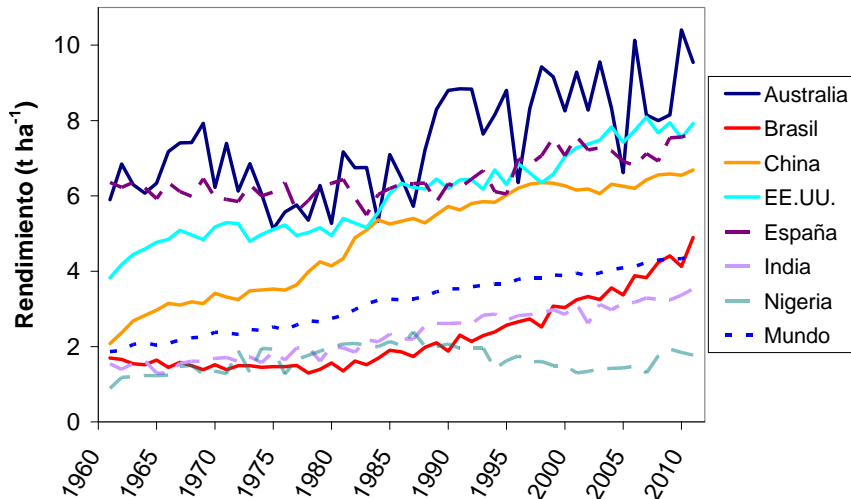


Figura I.4. Evolución del rendimiento en grano en España y diversos países productores de arroz. Fuente: FAOSTAT data, 2012.

I.2. CULTIVO TRADICIONAL DEL ARROZ: RIEGO POR INUNDACIÓN.

El cultivo tradicional del arroz se considera el más ineficiente en el uso del agua de riego, indicando el IRRI (1993) que en algunas ocasiones se llegan a emplear 5.000 L de agua para producir 1 kg de arroz, lo que equivale a 30.000 m³ ha⁻¹ para obtener una producción media de unos 6.000 kg de arroz. Esta baja productividad del agua de riego no se debe a unas necesidades hídricas elevadas del cultivo, sino al propio sistema de cultivo del arroz inundado. Este sistema requiere la aplicación de una gran cantidad de agua a la parcela para mantener una lámina de agua inundando la parcela a lo largo de su ciclo de cultivo. Mediante el sistema tradicional de cultivo del arroz la parcela está sometida a altas pérdidas de agua debidas a percolación profunda de la parcela inundada, escorrentía y evaporación directa de la lámina libre de agua a la atmósfera. Estas pérdidas de agua suponen, además, pérdidas de elementos minerales y pesticidas (Aulakh y Singh, 1996). Así, Abedin Mian *et al.* (1991) estimaron que las pérdidas por percolación pueden llegar a ser del 60% y Covay *et al.* (1992) señalan que la escorrentía superficial representa un 31% del total de agua de riego. Sin embargo, Shah y Edling (2000) señalan valores más reducidos. La eficiencia del uso del agua, medida como kg de grano m⁻³ de agua evapotranspirada, puede ser de hasta 1,6 kg m⁻³, comparable con la del resto de cereales, pero la eficiencia se reduce hasta 0,39 kg m⁻³ si se tiene en cuenta el resto de componentes hídricos y se utiliza el volumen de agua de riego utilizada en vez del agua evapotranspirada (Tuong y Bhuiyan, 1999).

Una mejora del manejo del riego que reduzca dichas pérdidas puede incrementar sustancialmente la productividad del agua en este cultivo. La mejora puede darse reduciendo la cantidad de agua que no contribuye a la formación del grano con diversas prácticas y estrategias (Boling *et al.*, 1998; Bouman y Tuong, 2001) que optimicen la aplicación de agua a la parcela y asegurando la dotación de riego a la parcela en los momentos adecuados.

Las pérdidas por percolación profunda se pueden reducir con la creación de un horizonte compactado mediante fangueo, pues la tasa de percolación puede reducirse hasta cinco veces en relación con un suelo no fangueado (Tuong *et al.*, 1994). Así, las pérdidas por percolación en suelos con horizontes compactados pueden ser de tan solo un 5-9% del total del agua aplicada (Covay *et al.*, 1992; Shah y Edling, 2000). Sin embargo, Kundu y Ladha (1999) sugieren que una cierta permeabilidad en las fincas arroceras es importante para mantener la fertilidad a largo plazo ya que el agua que percola lleva oxígeno disuelto a las raíces y diluye o elimina sustancias tóxicas, a pesar de que dicha percolación puede ocasionar pérdidas de nutrientes. En Japón se considera que una permeabilidad adecuada es 20-30 mm día⁻¹, en China, de 9-15 mm día⁻¹. Estos valores son superiores a los encontrados en el valle medio del Ebro (4-6 mm día⁻¹) (Martínez-Cob y Pérez-Coveta, 2006).

La superficie arroceras aumentó en Aragón en los años 90 hasta unas 14.000 ha, incrementando su rendimiento medio hasta 6.000 kg ha⁻¹ gracias a

la incorporación de nuevas variedades (Guadamar, Lido) bien adaptadas a las condiciones de la zona. Esta superficie se mantiene en la actualidad salvo los años con restricciones de agua. En el año 2010 la superficie cultivada de arroz fue de 11.756 ha (Tabla I.3). En el año 2008 la superficie cultivada de arroz fue de 9.956 ha (DGA, 2008). Estas cifras fueron inferiores a la de años anteriores debido a las limitaciones existentes en el suministro de agua de riego en estos dos años. Gran parte de los arrozales de Aragón se localizan en suelos salino-sódicos de elevada impermeabilidad donde el cultivo de arroz por inundación es el único uso sostenible de la tierra.

La técnica de fanguero es una estrategia muy utilizada en los regadíos de Aragón y otras zonas arroceras del Valle del Ebro para reducir pérdidas por percolación profunda. La suela de fanguero se crea mediante uno o dos pases de tractor con ruedas tipo jaula en el suelo inundado para compactar el suelo.

Las pérdidas por escorrentía superficial están condicionadas en parte por la gestión del agua en cada Comunidad de Regantes. En el Valle del Ebro, en zonas con disponibilidad de agua limitada el riego del arroz se hace principalmente mediante el uso de balsas particulares donde se almacena el agua de riego suministrado por la Comunidad de Regantes y el manejo del riego del arroz consiste en rellenar las parcelas cuando disminuye el nivel de agua en las mismas, eliminándose la escorrentía. En otras zonas se riega a turnos, rellenando las parcelas cada 15 días. Sin embargo, en zonas con disponibilidad media-alta, el agua circula continuamente por los tablares de arroz de forma que un pequeño caudal va pasando de una parcela a la siguiente situada a cota inferior. Unas pequeñas pérdidas de escorrentía se producen en la parcela más baja, que vierte al desagüe. Aunque evitar esta escorrentía puede suponer un ahorro de agua, los agricultores asocian esta práctica con un descenso en el rendimiento del cultivo. En zonas salinas y regadas con agua con una elevada concentración de sales, el mantenimiento del agua en circulación da mayores rendimientos (Zeng *et al.*, 2003). Sin embargo, otros estudios demuestran que reduciendo la altura de la lámina de agua, manteniendo el suelo saturado o alternando periodos secos y húmedos se puede ahorrar del 30% al 75% del agua de riego sin disminuir sustancialmente el rendimiento (Sandhu *et al.*, 1980; Mishra *et al.*, 1990).

Como se ha dicho anteriormente, el arroz en Aragón se cultiva preferentemente en parcelas con suelos salino-sódicos y con aguas de riego de baja salinidad, produciéndose procesos de dispersión, translocación y taponamiento de los poros por las arcillas, lo que unido a la compactación mecánica del suelo producida por el fanguero, lleva a la creación de un horizonte casi impermeable con la consiguiente reducción de las pérdidas por percolación profunda. Este horizonte, a su vez, impide o limita el ascenso capilar de freáticos salinos y la consiguiente salinización del suelo. El problema que presenta esta técnica es la casi irreversibilidad de la degradación de esos suelos y la imposibilidad de su recuperación para otros cultivos.

I.3. CULTIVO DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN.

El IRRI (1993) anunció la necesidad de aumentar la producción mundial de arroz en un 60% para el año 2020. La escasez de agua a nivel mundial y el aumento de la demanda de arroz están originando un interés por sistemas de cultivo en los que no se inundan los campos y se emplee menos agua de riego (Boling *et al.*, 1998; Bouman, 2001; Bouman *et al.*, 2005; Belder *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2002; Thompson, 2002). Estos sistemas se conocen en general como "aeróbicos" (IRRI, 2003). En España, Maclean *et al.* (2002) señalan como una de las limitaciones importantes para la producción de arroz la escasa disponibilidad de agua. Así, es un hecho conocido las importantes fluctuaciones que sufre la superficie dedicada al cultivo del arroz en diversas regiones españolas como Andalucía, Aragón y Extremadura dependiendo de la cantidad de agua disponible para riego en los embalses al inicio de la temporada de riegos.

Entre los sistemas de cultivo de arroz aeróbico el riego por aspersión es el que permite un mayor control de la dosis de agua aplicada. El cultivo del arroz bajo riego por aspersión es una técnica agronómica de gran interés ya que por un lado permite incrementar la productividad del agua de riego de dos a cuatro veces (Blackwell *et al.*, 1985), y por otro lado reduce las pérdidas por percolación profunda en suelos permeables. Además de un menor consumo de agua de riego, en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión se pueden reducir de forma importante algunos costes (laboreo, recolección, fitosanitarios) (Spanu y Pruneddu, 1996). Así, el interés del cultivo del arroz bajo riego por aspersión no se plantea como alternativa al cultivo tradicional bajo riego por inundación en suelos con capas cuasi impermeables, sino como una alternativa más de cultivo en suelos de potencial agronómico elevado, que supone un uso más eficiente del agua de riego.

En el Valle Medio del Ebro, el arroz (cultivado de forma tradicional con riego por inundación), la alfalfa y el maíz son los cultivos herbáceos extensivos más rentables. En años con restricciones en la dotación de agua de riego la superficie cultivada de arroz se ve reducida drásticamente. El cultivo de arroz con riego por aspersión permitiría adaptarse mejor a las restricciones de riego y permitiría atender el incremento futuro de la demanda de arroz cuando se produzca. Por ello es muy importante conocer las técnicas agronómicas necesarias para lograr una producción óptima del arroz en riego por aspersión.

En el ámbito mundial se ha estudiado el cultivo de arroz con riego por aspersión en Australia, Brasil, China, EE.UU. e Italia. Se han obtenido resultados muy dispares que demuestran que esta técnica de cultivo se comporta de manera diferente en función del tipo de suelo, del clima y del manejo. En general, parece existir una disminución del rendimiento respecto al riego por inundación, que varía entre un 10 y un 50% (Akkari *et al.*, 1986; Wescott y Vines, 1986; Muirhead *et al.*, 1989; McCauley, 1990). Sin embargo, hay que destacar que el cultivo de arroz bajo riego por aspersión tiene menores costes de cultivo que el arroz tradicional inundado ya que no requiere maquinaria especial y

el control de malas hierbas es en principio más económico. En Australia, Muirhead *et al.* (1989) compararon los rendimientos del arroz por inundación continua con arroz por aspersión observando que los rendimientos con aspersión no llegaron al 50% del rendimiento obtenido con inundación continua, observándose en el arroz regado por aspersión una reducción significativa del número de espiguillas por panícula y de la fertilidad de las flores, además de una deficiencia en fósforo. En Brasil, el riego por aspersión se utiliza en una parte importante de la superficie cultivada de arroz (Crusciol *et al.*, 2003b). Se trata de zonas de pluviometría elevada (cercanas a 1000 mm), donde las dosis estacionales de riego aplicadas son bajas ($<3000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), los suelos son ácidos y los rendimientos de 3 a 5 t ha^{-1} (Crusciol *et al.*, 2003a). En Brasil se están desarrollando numerosos estudios en distintas zonas de cultivo para conocer las mejores prácticas agronómicas del cultivo aeróbico del arroz como los de Pinheiro *et al.* (2006), Crusciol *et al.* (2008) y Reis *et al.* (2008). George *et al.* (2002) indican que en China se alcanzan rendimientos de 7 t ha^{-1} en el arroz con riego por aspersión. Datos recientes de la FAO (2014) indican que se cultivan bajo riego por aspersión 80.000 hectáreas en China y 250.000 ha en Brasil. En Estados Unidos, Wescott y Vines (1986) observaron una mayor incidencia de *Rizoctonia solani* en el arroz regado por aspersión, lo que provocó un menor rendimiento. Sin embargo, en Italia, Spanu y Pruneddu (2000) y Spanu y Murtas (2002), estudiando distintas variedades como Thaibonnet encontraron rendimientos superiores a 8 t ha^{-1} con consumos de agua de riego de 7.500 a $9.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ durante el ciclo de cultivo, similares a los del maíz o la alfalfa y que suponen hasta un 50% en ahorro de agua frente al riego por inundación tradicional (Bouman *et al.*, 2002; Spanu y Murtas, 2002).

En España sólo existe cierta experiencia en arroz cultivado bajo riego por aspersión en Extremadura (Junta de Extremadura, 1999). Se ha observado que en las variedades de grano largo el rendimiento con riego por aspersión fue de un 80% del rendimiento con riego por inundación, mientras que en las variedades de grano redondo el rendimiento con riego por aspersión fue de un 50-60% del obtenido con riego por inundación (Batalla, 1999). Los consumos medios de agua de riego fueron de $20.700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en riego por inundación y $9.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en riego por aspersión.

El sistema de cultivo de arroz bajo riego por aspersión supone un cambio muy importante para la planta y el suelo en comparación del sistema tradicional de cultivo con el terreno inundado.

En lo referente a las necesidades de riego, hay que considerar que con riego por aspersión la evapotranspiración cambia al reducirse las pérdidas por evaporación directa de agua desde el suelo, pero las plantas se encuentran en un ambiente más seco que puede aumentar la transpiración. En lo referente a las necesidades de fertilización, no existe unanimidad en cuanto a la menor disponibilidad de nutrientes en el riego por aspersión (Westcott y Vines, 1986) comparado con el riego por inundación, salvo en el caso del fósforo, que pare-

ce que está menos disponible en condiciones de riego por aspersión, atribuyéndose a su falta las disminuciones de rendimiento. Sin embargo, los ensayos realizados en Italia con suelos neutros o alcalinos mostraron rendimientos similares con los dos sistemas de riego (Spanu y Pruneddu, 1996), lo que puede ocurrir también en el Valle Medio del Ebro, donde predominan los suelos calcáreos con un pH alto. Respecto a las pérdidas de nitrógeno con este sistema de riego, las pérdidas de nitrógeno por escorrentía desaparecen, pero pueden aumentar las debidas a percolación, por lo que será importante estudiar la respuesta del cultivo a la dosis y el fraccionamiento de la fertilización nitrogenada.

Otro aspecto que se ve modificado es la flora de malas hierbas y su competencia con el arroz. El control de las malas hierbas en el cultivo tradicional se basa en gran medida en la existencia de una lámina de agua que impide el desarrollo de especies no aptas a condiciones anaeróbicas. Ello provoca una selección de las especies de malas hierbas adaptadas a dichas condiciones y ha dado lugar a un desarrollo de herbicidas diseñados para el control de dichas especies en el cultivo tradicional con presencia de lámina de agua. Sin embargo, existe poca información tanto sobre la selectividad como sobre la eficacia de los herbicidas en el cultivo del arroz aeróbico, incluido el cultivado bajo riego por aspersión (Akkari *et al.*, 1986), y menos aún en zonas de clima semiárido como el Valle Medio del Ebro.

El cultivo del arroz con riego por aspersión en las condiciones semiáridas del Valle Medio del Ebro implica una serie de incógnitas agronómicas cuya respuesta requiere la investigación en campo. Los distintos aspectos agronómicos que hay que estudiar incluyen los siguientes: comportamiento de las distintas variedades, dosis de agua de riego que hay que aplicar al cultivo, dosis de fertilizantes a aplicar al cultivo y programas herbicidas para el control de las malas hierbas. Estos son los temas que se estudian en la presente tesis.

CAPÍTULO II.

OBJETIVOS

II.1. OBJETIVOS.

El objetivo principal de esta tesis es estudiar la viabilidad del cultivo del arroz bajo riego por aspersión en el Valle Medio del Ebro con un menor consumo de agua que el cultivo tradicional bajo riego por inundación y con unos rendimientos aceptables.

Para ello se han realizado diversos ensayos de campo durante los años 2001 a 2004 en los que se ha estudiado la respuesta productiva del arroz en riego por aspersión a distintas variables agronómicas del cultivo. Los objetivos parciales de esta tesis son los siguientes:

- 1) Valorar las variedades de arroz más adaptadas al riego por aspersión en las condiciones climatológicas del Valle Medio del Ebro.
- 2) Estudiar la respuesta productiva del arroz a distintas dosis de agua aplicada en riego por aspersión.
- 3) Evaluar la respuesta productiva del arroz en riego por aspersión a la fertilización nitrogenada y fosfórica y al fraccionamiento de la fertilización nitrogenada.
- 4) Optimizar el control de malas hierbas del arroz en riego por aspersión mediante distintos programas de tratamientos herbicidas.

Así, la tesis se estructura en 9 capítulos en los que se estudian los distintos aspectos agronómicos mencionados.

En el Capítulo I se presenta una visión general de la importancia y estado del cultivo del arroz en el mundo y en España. Se discute la importancia de este cultivo en el mundo y se presenta la problemática existente del cultivo tradicional del arroz, así como los avances realizados en el conocimiento del cultivo del arroz aeróbico en el mundo y las posibilidades del cultivo del arroz por aspersión en España. El Capítulo II recoge los objetivos de la Tesis. En el Capítulo III se describen las características físicas del suelo de las parcelas, de las fincas experimentales de la Estación Experimental de Aula Dei del CSIC (EEAD-CSIC) y del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) localizadas en Montañana (Zaragoza) donde se realizaron todos los ensayos agronómicos del cultivo de arroz en aspersión. Asimismo en este capítulo se presentan y se discuten las variables meteorológicas durante las 4 campañas, del 2001 al 2004, en que se han desarrollado los ensayos agronómicos. En el Capítulo IV se estudia la respuesta productiva y adaptación de distintas variedades comerciales que se cultivan ampliamente en el Valle del Ebro al sistema de riego por aspersión. En el Capítulo V se estudia la respuesta de las variedades de arroz más interesantes a un suministro variable de agua de riego por aspersión para conocer la dosis de riego más adecuada. En

estos ensayos de campo se ha utilizado la técnica de la fuente lineal de aspersión que es ampliamente utilizada para conocer la respuesta de los cultivos al suministro variable de agua de riego. En el Capítulo VI se estudia la respuesta del arroz a distintas dosis de abonado nitrogenado y fosfórico y distintos fraccionamientos del abonado nitrogenado. En el Capítulo VII se estudia la selectividad y eficacia de distintos tratamientos herbicidas con el fin de llegar a establecer el programa de tratamientos más adecuado para el control de malas hierbas en este sistema de cultivo. En el Capítulo VIII se aborda una discusión general sobre los resultados obtenidos y se exponen las conclusiones finales. Por último, en el Capítulo IX se muestra la bibliografía consultada.

CAPÍTULO III.

**CARACTERIZACIÓN
METEOROLÓGICA Y EDÁFICA.**

III.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describen las características climatológicas y edáficas de los distintos ensayos efectuados en los años 2001, 2002, 2003 y 2004. En primer lugar se presenta una descripción de las condiciones meteorológicas de cada campaña de cultivo del arroz (mayo a octubre) en relación a un año medio obtenido del registro de 1990 a 2009. Asimismo, se presenta una caracterización edáfica de los suelos de las parcelas dónde se realizaron los ensayos.

Los trabajos comprendidos en la presente tesis se agrupan en los ensayos siguientes: ensayo de comportamiento de variedades de arroz que se realizó en el año 2001 (Variedades), ensayos de respuesta del arroz a distintas dosis de riego que se efectuaron en los años 2001, 2002 y 2004 (Dosis de riego), ensayos de respuesta del arroz a la fertilización nitrogenada y fosfórica que se efectuaron en los años 2002, 2003 y 2004 (Fertilización) y ensayos de control de malas hierbas que se efectuaron en los años 2003 y 2004 (Control de malas hierbas).

Los ensayos se efectuaron en cuatro parcelas de las dos fincas experimentales del campus de Aula Dei en Montañana (Zaragoza): una es la finca experimental del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) del Gobierno de Aragón y la otra es la finca de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC) (Tabla III.1). Los ensayos que se repitieron en años consecutivos en la parcela 3 no se realizaron sobre la misma ubicación sino que se movieron a otra zona de la misma parcela.

Tabla III.1. Localización de los ensayos.

Parcela	Finca	Ensayos	Año
1	CITA	Variedades	2001
2	EEAD-CSIC	Dosis de riego	2001
		Dosis de riego	2002
3	EEAD-CSIC	Fertilización	2002
			2003
		Control de malas hierbas	2002
			2003
4	EEAD-CSIC	Dosis de riego	2004
		Fertilización	2004
		Control de malas hierbas	2004

Ambas fincas distan menos de 1 km y se hallan situadas en unas coordenadas geográficas medias de 41° 43' N y 0° 49' W. La finca del CITA se encuentra en las terrazas situadas junto al río Gállego a una elevación media de unos 225 m y se riega a partir de la acequia Urdana. La finca de la EEAD en Montañana ocupa terrazas más antiguas y más alejadas del río Gállego con una elevación media de 240 m y se riega principalmente a partir de la acequia Camarera. Ambas acequias toman el agua del río Gállego pero la toma de la

acequia Camarera está situada aguas arriba de la toma de la acequia Urdana. La salinidad del agua de la acequia Camarera tiene una conductividad eléctrica (CE_a) de alrededor de $0,7 \text{ dS m}^{-1}$, sensiblemente menor que la de la acequia Urdana que varía de $1,6$ a $2,3 \text{ dS m}^{-1}$.

III.2. CLIMA.

Los datos meteorológicos, a excepción de la precipitación, se obtuvieron de la Estación Meteorológica Automática de la finca experimental del CITA, equipada con sensores para determinar temperatura del aire, humedad relativa del aire, precipitación, dirección y velocidad del viento y radiación solar y un datalogger Campbell CR10X (Campbell Scientific Ltd., Shesped, Gran Bretaña). Los valores de precipitación se obtuvieron de la Estación Meteorológica de la Estación Experimental de Aula Dei.

Los datos meteorológicos medios mensuales en los meses de cultivo de los cuatro años de ensayos han sido similares, si bien cabe destacar algunas diferencias de interés (Tablas III.2 a III.5). La precipitación en los meses de verano en 2001 y 2004 fue inferior a la ocurrida en los años 2002 y 2003 y a la correspondiente al año medio. Por el contrario, las campañas de 2002 y 2003 tuvieron una pluviometría superior a la del año medio, sobre todo en los meses de mayo, septiembre y octubre (Figura III.1).

Los valores medios mensuales de las temperaturas máximas del aire del año 2003 fueron mayores que en los restantes años. El valor medio mensual de las temperaturas mínimas en septiembre de los años 2001 y 2002 fue inferior al de los años 2003 y 2004. El año 2003 fue el más caluroso con valores de temperaturas máximas superiores a los del año medio de mayo a agosto (Figura III.2). Los años 2001, 2002 y 2004 tuvieron unas temperaturas máximas similares a las del año medio. Los valores de las temperaturas mínimas de junio, julio y agosto de 2003 también fueron superiores a las del año medio. Hay que destacar los valores de las temperaturas mínimas inferiores a los del año medio en los meses de julio a octubre del año 2002. En resumen, las campañas de los años 2001 y 2002 fueron más frías que la correspondiente a la media del registro de los años 1990-2009.

Estas pequeñas diferencias en la meteorología específica de cada año han tenido importancia en la producción del arroz y ayudan a explicar los resultados obtenidos en los ensayos como se verá en los apartados correspondientes.

Tabla III.2. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2001.

MES	Lluvia (mm)	T ^a med (°C)	T ^a máx (°C)	T ^a mín (°C)	HR med (%)	HR máx (%)	HR mín (%)	Radiación (W m ⁻²)	V viento (m s ⁻¹)
Mayo	51	18,0	25,5	10,6	59	87	30	289	2,2
Junio	7	22,9	31,9	13,8	48	81	20	330	2,3
Julio	7	23,4	31,9	15,0	54	87	25	298	1,9
Agosto	2	24,9	33,2	17,2	55	84	26	262	1,8
Septiembre	60	18,5	26,1	11,7	62	86	34	218	2,3
Octubre	25	16,9	24,2	11,3	75	95	44	140	1,3

Tabla III.3. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2002.

MES	Lluvia (mm)	T ^a med (°C)	T ^a máx (°C)	T ^a mín (°C)	HR med (%)	HR máx (%)	HR mín (%)	Radiación (W m ⁻²)	V viento (m s ⁻¹)
Mayo	69	16,5	23,2	9,8	59	85	34	276	3,0
Junio	48	22,2	30,5	14,3	53	84	26	304	2,2
Julio	38	23,1	31,0	15,7	54	80	27	320	3,1
Agosto	11	22,3	29,8	15,7	58	84	31	266	2,5
Septiembre	61	19,0	26,7	12,3	66	91	33	216	1,8
Octubre	50	14,9	22,0	8,7	75	93	46	137	1,7

Tabla III.4. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2003.

MES	Lluvia (mm)	T ^a med (°C)	T ^a máx (°C)	T ^a mín (°C)	HR med (%)	HR máx (%)	HR mín (%)	Radiación (W m ⁻²)	V viento (m s ⁻¹)
Mayo	77	17,6	25,1	10,3	60	86	32	284	2,6
Junio	22	25,3	33,8	17,4	54	84	25	306	1,9
Julio	0	25,7	33,9	17,6	49	79	21	318	2,1
Agosto	8	26,2	35,1	17,5	52	85	22	269	1,5
Septiembre	64	19,5	26,5	13,6	69	91	39	194	2,0
Octubre	79	14,4	20,0	9,5	73	91	49	126	2,0

Tabla III.5. Datos meteorológicos medios mensuales de la campaña de cultivo del arroz en 2004.

MES	Lluvia (mm)	T ^a med (°C)	T ^a máx (°C)	T ^a mín (°C)	HR med (%)	HR máx (%)	HR mín (%)	Radiación (W m ⁻²)	V viento (m s ⁻¹)
Mayo	38	16,3	23,4	9,4	63	89	32	285	2,3
Junio	15	23,7	32,1	15,2	51	82	24	330	2,5
Julio	27	23,7	31,9	16,1	53	87	25	315	2,4
Agosto	12	24,0	32,3	16,4	55	85	26	264	1,9
Septiembre	20	21,0	28,9	14,4	61	87	31	216	2,4
Octubre	32	16,5	24,3	10,1	68	91	36	142	1,4

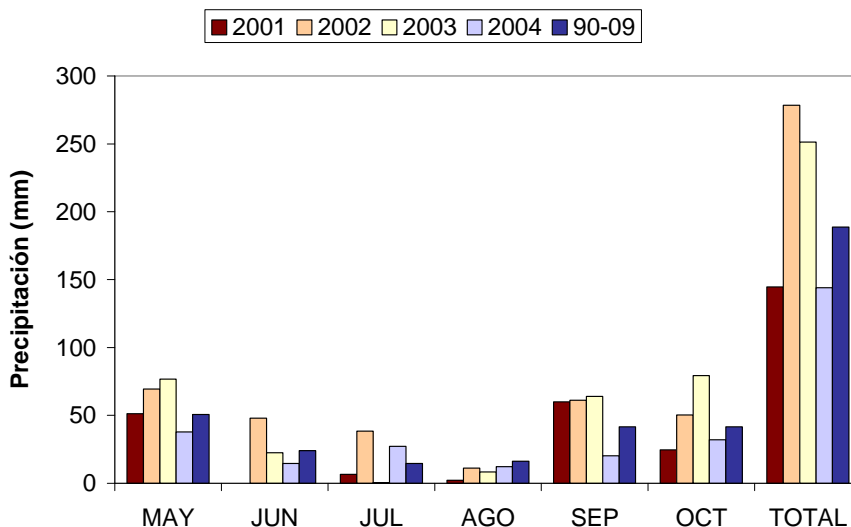


Figura III.1. Valores medios mensuales de la precipitación en los años 2001, 2002, 2003, 2004 y en el año medio correspondiente al registro de 1990 a 2009 en la estación meteorológica de Aula Dei en Montañana (Zaragoza). El valor total corresponde a la suma de los valores mensuales de mayo a octubre.

Los registros de viento indicaron que la dirección predominante durante la campaña de cultivo del arroz en los cuatro años estudiados fue del norte-noroeste (N-NW) (datos no presentados) y que la velocidad del viento superó muy a menudo los 2 m s^{-1} (Tablas III.2 a III.5), valor límite aconsejado para obtener una distribución uniforme del riego por aspersión (Faci y Bercero, 1991). Esta dirección dominante de los vientos es muy típica del Valle del Ebro y se corresponde con el viento localmente denominado *cierzo* que se encauza en la dirección del Valle del Ebro (N-NW) y es un viento seco y de gran intensidad (Puicercús *et al.*, 1994). Sin embargo, los riegos se efectuaron siempre con velocidades de viento inferiores a 2 m s^{-1} con objeto de asegurar una buena uniformidad de distribución del riego en todos los ensayos planteados en esta tesis y especialmente en los ensayos de dosis de riego establecidos con la fuente lineal de aspersión. La campaña que tuvo menores velocidades de viento fue la correspondiente al año 2003.

Además de la temperatura y la precipitación, la radiación solar afecta directamente al crecimiento y al rendimiento del arroz (Gupta y O'Toole, 1986). La evolución de la radiación solar diaria a lo largo de las cuatro campañas de cultivo de arroz (Figura III.3) ha seguido un comportamiento normal, con los máximos de radiación (350 a 370 W m^{-2}) en los meses de mayo a julio, para ir descendiendo de manera gradual posteriormente.

Las curvas de evolución de los valores diarios de la humedad relativa máxima y mínima del aire en las cuatro campañas estudiadas han seguido las oscilaciones típicas de este parámetro meteorológico con una gran parte de los

valores de la humedad relativa máxima en el rango entre el 75% y 95% y los valores mínimos en el rango situado entre el 20% y 40% (Figura III.4). Los valores más bajos de la humedad relativa mínima se producen en los meses de junio y julio. Se observa que conforme avanza la estación, los valores de la humedad relativa mínima tienden a aumentar ligeramente.

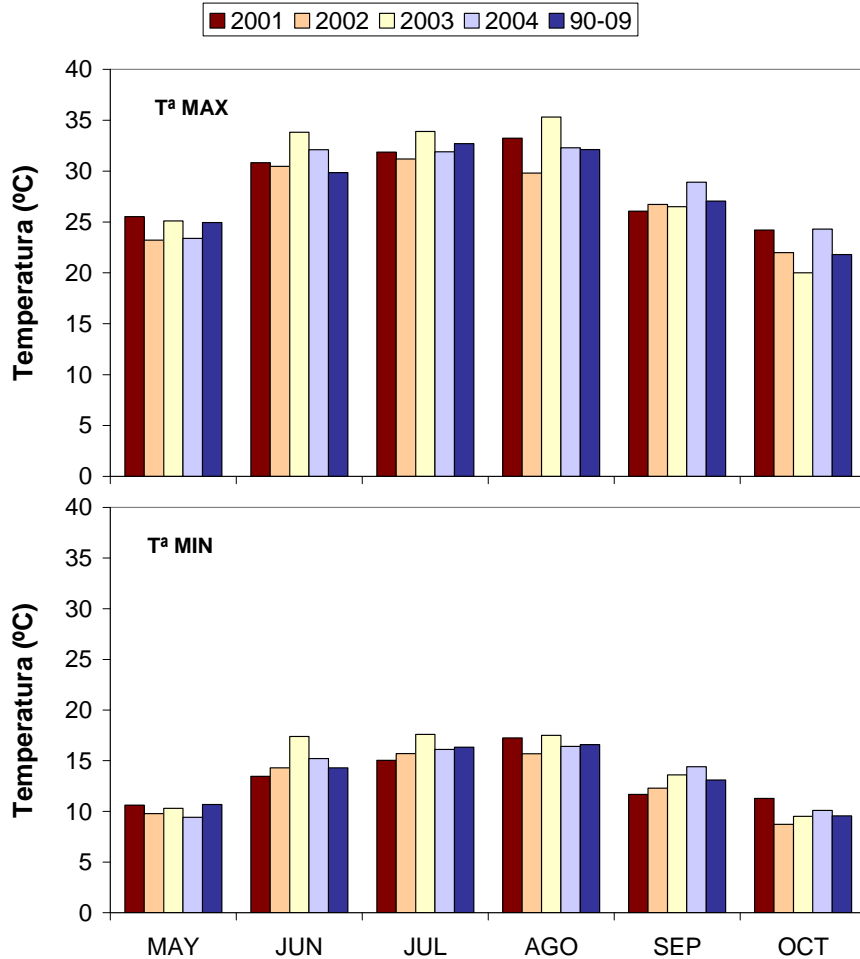


Figura III.2. Valores medios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas del aire en los años 2001, 2002, 2003, 2004 y en el año medio correspondiente al registro de 1990 a 2009 en la estación meteorológica del CITA en Montañana (Zaragoza).

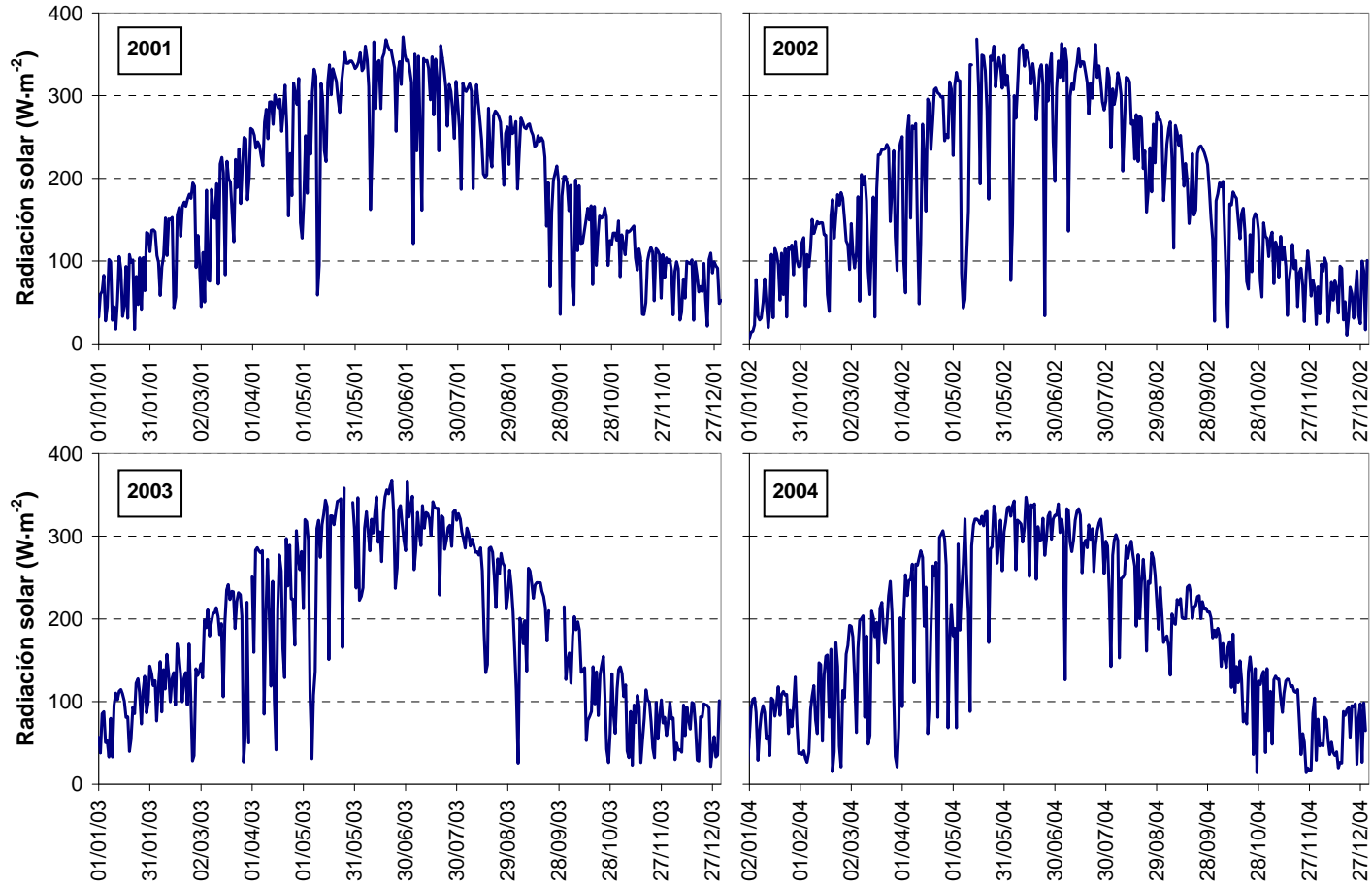


Figura III.3. Radiación solar diaria a lo largo de los años 2001 a 2004.

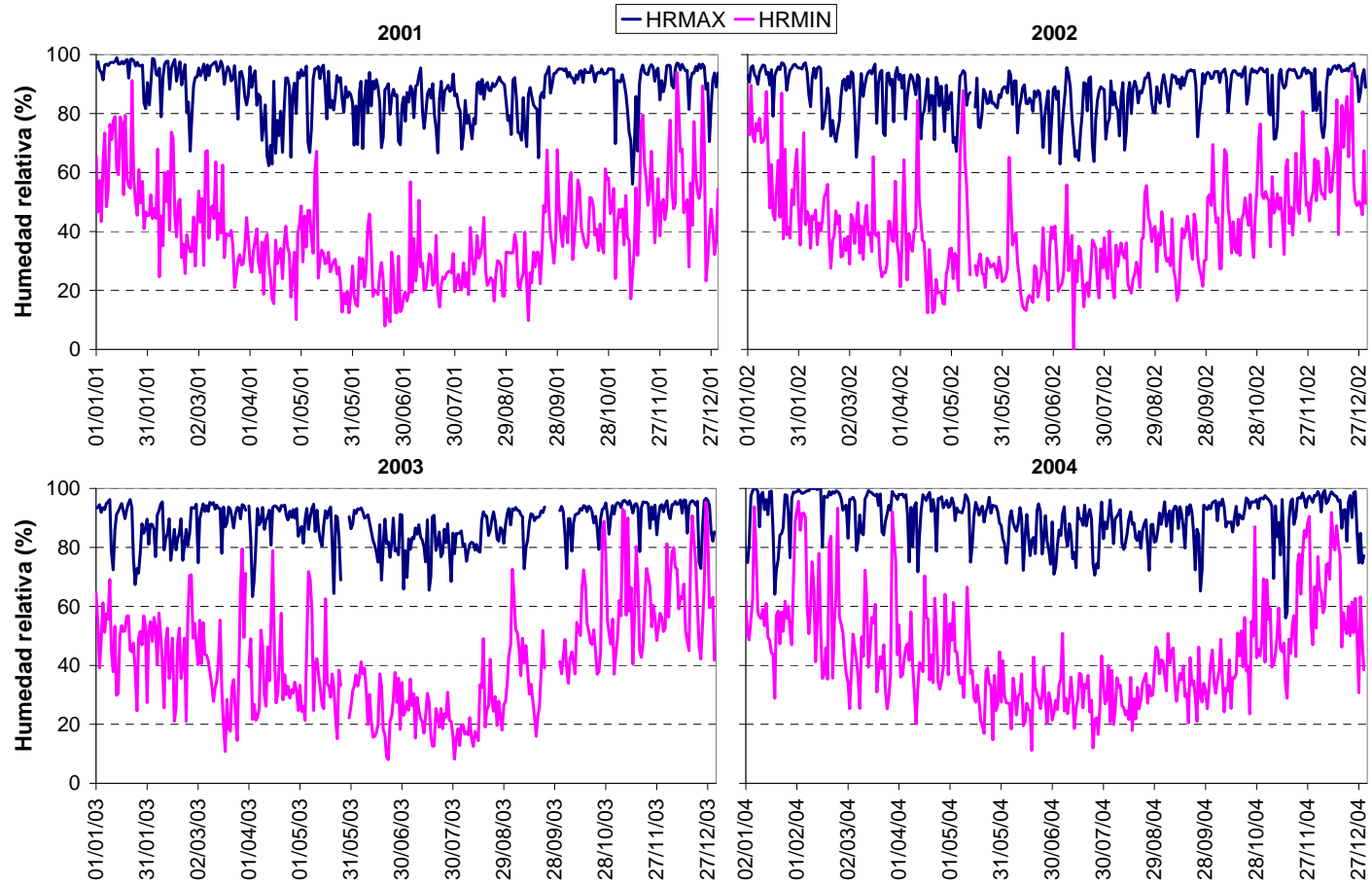


Figura III.4. Humedad relativa del aire máxima y mínima diaria en los años 2001 a 2004.

III.3. SUELO Y AGUA DE RIEGO.

El suelo de las cuatro parcelas experimentales utilizadas en los distintos ensayos, situadas en las terrazas del río Gállego, está clasificado como Typic Xerofluvent (SSS, 1992). Las características físico-químicas de los suelos de las parcelas experimentales fueron determinadas en el Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón (Tablas III.6 a III.9) a excepción de los valores de conductividad eléctrica del extracto de suelo (CE_e), que se determinaron en el laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA (Gobierno de Aragón).

Tabla III.6. Caracterización edáfica de la Parcela 1. Ensayo de variedades, campaña 2001.

Prof. (cm)	pH	CE_e (dS m ⁻¹)	CO ₃ Ca (%)	MO (%)	p ⁽¹⁾ (ppm)	K ⁽²⁾ (ppm)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Clase ⁽³⁾ text.
0 - 37	8,3	5,55	37,7	2,35	50	644	54,2	32,5	13,3	F-Ar
37 - 53	8,4	4,46	37,6	1,10	7	268	50,6	36,5	12,9	Ar
53 - 110	8,5	4,98	38,7	0,67	1	61	55,3	34,0	10,7	F-Ar

(1) Método Olsen; (2) Método del acetato amónico; (3) Clase textural: F: franca; Ar: arenosa.

Tabla III.7. Caracterización edáfica de la Parcela 2. Ensayo de dosis de riego campaña 2001.

Prof. (cm)	pH	CE_e (dS m ⁻¹)	CO ₃ Ca (%)	MO (%)	p ⁽¹⁾ (ppm)	K ⁽²⁾ (ppm)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Clase ⁽³⁾ text.
0 - 30	8,4	0,21	33,7	0,88	11	126	50,3	27,3	22,4	F-a-Ar
30 - 60	8,4	0,21	33,8	1,22	9	131	44,0	29,8	26,2	F
60 - 90	8,4	0,20	30,8	0,89	5	117	41,4	29,7	29,0	F-a
90 - 120	8,5	0,19	31,0	- -	2	78	50,7	19,7	29,6	F-a-Ar

(1) Método Olsen; (2) Método del acetato amónico; (3) Clase textural: F: franca; a: arcillosa; Ar: arenosa.

Tabla III.8. Caracterización edáfica de la Parcela 3. Ensayos campañas 2002 (dosis de riego, fertilización y control de malas hierbas) y 2003 (fertilización y control de malas hierbas).

Prof. (cm)	pH	CE_e (dS m ⁻¹)	CO ₃ Ca (%)	MO (%)	p ⁽¹⁾ (ppm)	K ⁽²⁾ (ppm)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Clase ⁽³⁾ text.
0 - 30	8,5	0,17	30,9	1,49	4	134	20,0	45,8	34,2	F-a-L
30 - 60	8,5	0,19	31,6	1,30	3	116	18,3	51,3	30,5	F-a-L
60 - 90	8,6	0,17	30,7	0,85	1	98	20,2	50,3	29,5	F-a
90 - 120	8,6	0,16	30,3	0,72	1	88	19,1	50,3	30,6	F-a-L

(1) Método Olsen; (2) Método del acetato amónico; (3) Clase textural: F: franca; a: arcillosa; L: limosa.

Tabla III.9. Caracterización edáfica de la Parcela 4. Ensayos campaña 2004 (dosis de agua, fertilización y control de malas hierbas).

Prof. (cm)	pH	CE _e (dS m ⁻¹)	MO (%)	p ⁽¹⁾ (ppm)	K ⁽²⁾ (ppm)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Clase ⁽³⁾ text.
0 - 30	8,4	0,22	1,80	16	155	26,5	45,4	28,1	F-a
30 - 60	8,4	0,24	1,59	13	149	24,0	46,9	29,1	F-a
60 - 90	8,4	0,21	0,94	5	119	17,4	50,0	32,6	F-a-L

(1) Método Olsen; (2) Método del acetato amónico; (3) Clase textural: F: franca; a: arcillosa; L: limosa.

El pH de todos los perfiles de suelo analizados estuvo entre 8,3 y 8,6. La conductividad eléctrica del extracto de suelo (CE_e) en la parcela 1 es mucho más elevada que la de las demás parcelas, considerándose dicho suelo entre ligera y moderadamente salino, con algún punto de los que se usaron para caracterizar la parcela fuertemente salino (12,3 dS m⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad, medido a inicios de 2006 (Tabla III.6)), siendo el arroz un cultivo especialmente sensible a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977; Zeng y Shannon, 2000). Ayers y Westcot (1985) establecieron el valor límite de tolerancia del arroz a la salinidad del suelo (CE_e) y del agua de riego (CE_a), bajo riego por inundación, en 3,0 y 2,0 dS m⁻¹ respectivamente, indicando que en condiciones de riego por aspersión el arroz es todavía más sensible.

La fertilidad de las parcelas es adecuada en el caso de la 2 y la 4. Sin embargo, la parcela 1 tiene unos valores elevados de P y K, pero la parcela 3 tiene valores bajos de contenido en fósforo. Se trata de suelos básicos típicos de las terrazas fluviales del valle del Ebro.

La granulometría varía de unas parcelas a otras, siendo más ligero el suelo de la parcela 1, seguido de la parcela 2. El alto porcentaje de limo y arcilla en las parcelas 3 y 4 provoca que con los primeros riegos tras el labrado del suelo se forme una costra superficial muy dura, con el consiguiente sellado del suelo y la dificultad de nascencia del arroz, por lo que en dichas parcelas se requiere un incremento de la frecuencia del riego en la fase de establecimiento del cultivo para facilitar la emergencia de las plántulas de arroz.

En cuanto a la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), las dos parcelas contiguas 3 y 4 tienen valores muy similares con valores medios volumétricos de CC de 36% y de PMP de 20% mientras que las parcelas 1 y 2 presentan menores valores de CC y PMP. Los valores volumétricos de CC y PMP fueron de 27,8% y 8,9% en la parcela 1 y de 29,0% y 17,1% en la parcela 2, respectivamente (Tabla III.10). Hay que destacar la gran diferencia obtenida en los valores del PMP obtenidos en las parcelas 1 y 2 a pesar de tener unos valores de CC muy similares.

Tabla III.10. Valores volumétricos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) de las parcelas experimentales. Los valores de las parcelas 2 a 4 se estimaron según Rawls y Brakensiek (1989).

Perfil del suelo (cm)	Porcentaje en volumen (%)			
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
	0-110	0-120	0-120	0-90
CC	27,8	29,0	36,8	36,3
PMP	8,9	17,1	20,2	19,8

El agua de riego procede de las acequias Urdana y Camarera. Se ha analizado a lo largo de los cuatros años de ensayo en el Laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA (Gobierno de Aragón) tanto la salinidad como el contenido en nitratos (Tabla III.11). La acequia Urdana suministra el agua de riego a la Parcela 1 mientras que la acequia Camarera riega las otras tres parcelas experimentales.

Tabla III.11. Valores máximos, medios y mínimos de conductividad eléctrica (CE_a) y contenido en NO_3^- del agua de riego de las acequias Urdana y Camarera, en las campañas de riego de 2001 a 2004.

Año	CE_a (dS m^{-1})						NO_3^- (ppm)					
	Urdana			Camarera			Urdana			Camarera		
	Máx	Med	Mín	Máx	Med	Mín	Máx	Med	Mín	Máx	Med	Mín
2001	2,4	1,7	0,6	0,9	0,6	0,4	24,3	18,8	14,1	9,8	6,5	2,2
2002	3,1	2,2	1,6	0,9	0,7	0,5	38,3	18,2	8,9	17,5	8,3	3,9
2003	2,9	1,5	0,6	1,1	0,6	0,4	28,6	11,4	2,8	14,1	5,2	1,8
2004	2,8	1,8	1,0	0,9	0,7	0,5	19,0	11,5	4,5	9,7	5,6	2,2

Análisis realizados en el laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA (Gobierno de Aragón).

Así, la salinidad del suelo de la Parcela 1 es debida en gran medida a la carga de sales del agua de riego procedente de la acequia de riego Urdana, que ha alcanzado valores de conductividad eléctrica desde el inicio de los ensayos en 2001 hasta su conclusión en 2004 comprendidos entre 0,6 y 3,1 dS m^{-1} . El alto valor alcanzado en la campaña de riegos de 2001 (2,4 dS m^{-1}) hizo que se continuaran los ensayos en otras parcelas experimentales (Parcelas 2, 3 y 4) que reciben el agua de riego de la acequia Camarera, de mejor calidad que la de la acequia Urdana (con valores de conductividad entre 0,4 y 1,1 dS m^{-1}), y que no presentan problemas de salinidad edáfica (Tabla III.11).

La evolución del contenido en nitratos del agua de ambas acequias responde de forma similar a la evolución de la salinidad (Tabla III.11). Además, hay una mayor variabilidad a lo largo de las campañas en los valores en la acequia Urdana que en la Camarera (Figura III.5).

En los muestreos del agua de riego en que se analizó el contenido en Na^+ , Mg^{++} y Ca^{++} los valores de SAR estuvieron comprendidos entre 0,27 y 1,15.

En tan sólo uno de dichos muestreos de la acequia Urdana el resultado del SAR (0,27), en relación con la CE_a ($0,62 \text{ dS m}^{-1}$), manifestó una ligera restricción de uso por afectar a la tasa de infiltración de agua en el suelo, de acuerdo con Ayers y Westcot (1985).

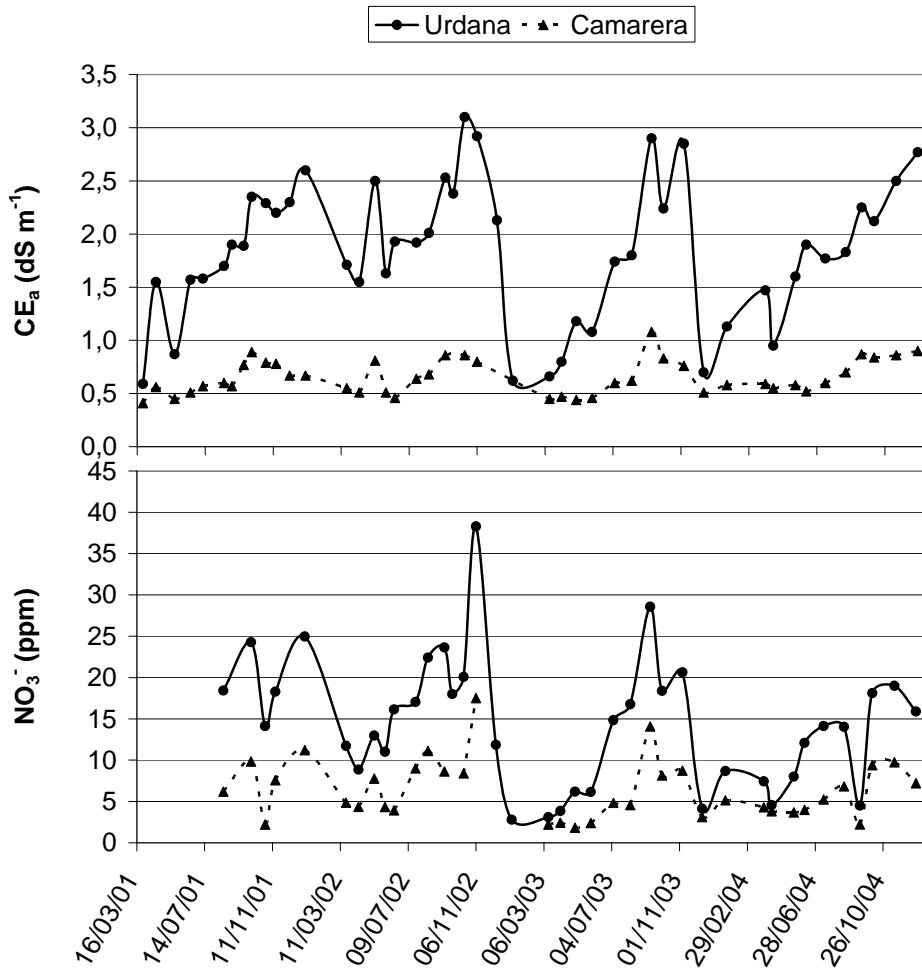


Figura III.5. Evolución de la conductividad eléctrica (CE_a) y del contenido en N-NO_3^- del agua de riego de las acequias Urdana y Camarera, en las campañas de riego de 2001 a 2004.

CAPÍTULO IV.

**COMPORTAMIENTO DE
VARIETADES DE ARROZ
CULTIVADAS CON RIEGO POR
ASPERSIÓN.**

IV.1. INTRODUCCIÓN.

El arroz (género *Oryza*) tolera un gran abanico de condiciones ambientales: desérticas, alta temperatura y humedad, inundaciones, aridez y frío, y se cultiva en suelos salinos, alcalinos y ácidos, tal como se ha indicado en el primer capítulo, gracias a las diferencias entre variedades (UNCTAD, 2006).

El sistema de cultivo más extendido en arroz, a pesar de las grandes diferencias varietales existentes, es el del arroz "lowland", cuya característica principal es el de tener las parcelas inundadas y por lo tanto en condiciones anaerobias. Por el contrario, el arroz "upland" se caracteriza por ser un cultivo de secano, sin hacer fangueo en el suelo y con siembra en seco, estando el suelo en condiciones aerobias. Hay que destacar que el arroz "upland" en secano se cultiva en zonas de alta pluviometría y su cultivo en los secanos mediterráneos sería inviable debido a las bajas pluviometrías. Las variedades conocidas como "lowland" son altamente productivas pero requieren un alto nivel de insumos, mientras que las variedades "upland", más resistentes a condiciones de estrés, tienen unos rendimientos menores (Lafitte *et al.*, 2006b).

Lafitte *et al.* (2002, 2006a, 2006b) subrayan que se está dedicando un gran esfuerzo en la mejora del cultivo del arroz, para que éste pueda seguir siendo productivo ante la escasez de agua a nivel mundial. Estos esfuerzos están encaminados tanto a la búsqueda de sistemas que reduzcan el uso de agua modificando las prácticas culturales, como a la selección genética de variedades resistentes a estrés hídrico cruzando variedades "lowland" con variedades "upland".

En China se están seleccionando desde hace unos años variedades que se adaptan mejor a condiciones aerobias, variedades conocidas como Han Dao (Bouman *et al.*, 2002; 2006). En Italia (Battilani y Pietrosi, 1991; Guiducci *et al.*, 1999; Spanu y Pruneddu, 1999, 2000) se han realizado estudios sobre la adaptabilidad de distintas variedades al riego por aspersión, llegando a conseguir rendimientos en algunas variedades superiores a las 10 t ha⁻¹. En Brasil (Pinheiro *et al.*, 2006) estos rendimientos son mucho menores, pues parten de variedades "upland".

También en África se está dedicando un esfuerzo muy importante en la mejora genética del arroz, desarrollando lo que han denominado variedades NERICA. Dichas variedades provienen de la hibridación de las dos especies más importantes a nivel mundial, *O. sativa*, de alta productividad, x *O. glaberrima*, de alta resistencia pero bajo rendimiento, para lograr variedades más productivas que las locales, aunque resistentes a las condiciones africanas (WARDA, 2001; AfricaRice, 2010).

Diversos estudios indican que en condiciones aerobias, lo cual sucede cuando se riega por aspersión, el sistema radicular se desarrolla más rápidamente que la parte aérea de la planta (Shi *et al.*, 2002). Se ha observado que

el efecto de este sistema de riego afecta al desarrollo de las distintas variedades en distinto grado (Westcott y Vines, 1986; Dabney y Hoff, 1989; Guiducci *et al.*, 1999). Experimentos desarrollados para comparar tres sistemas de cultivo (inundado, sin inundar e inundación intermitente) han destacado una mayor actividad radicular en aquellos casos en que había condiciones aerobias frente a las anaerobias (Shi *et al.*, 2002). Por el contrario, Spanu *et al.* (2004), obtuvieron una mayor densidad radicular en riego por inundación que en el riego por aspersión, y sin embargo el rendimiento en grano fue mayor en el segundo sistema, por lo que interpretaron que también hay una mayor eficiencia del sistema radicular en condiciones aerobias.

En condiciones normales de riego bajo inundación cada planta produce de 2 a 5 tallos fértiles. La intensidad y la fecha de inicio del ahijamiento dependen de muchos factores relacionados con las características genéticas de la variedad cultivada, con las condiciones climáticas y edáficas del lugar y con las técnicas agronómicas empleadas. Las temperaturas demasiado bajas reducen o inhiben el ahijamiento, como también el terreno poco fértil y la elevada densidad de siembra. Así, en el cultivo tradicional del arroz con riego por inundación un factor clave es el control de la temperatura del aire mediante el manejo del agua de riego ya que la temperatura de ésta logra controlar la temperatura del aire, haciendo que las oscilaciones térmicas sean menores, y por lo tanto la planta crezca en un ambiente más favorable (López Bellido, 1991). En el cultivo del arroz bajo riego por aspersión es de prever que la planta estará sometida a mayores cambios de temperatura.

La fase de floración es muy sensible a velocidades altas del viento, a la escasez de agua, a la lluvia y a temperaturas extremas. La temperatura óptima en la fase de floración es de 30°C y por debajo de 15°C se producen problemas de fertilidad de las espiguillas. Posteriormente, en la fase de llenado del grano se necesita un gradiente diario de temperatura, favoreciéndole las temperaturas nocturnas algo frías. Peng *et al.* (2004) señalan que el aumento de las temperaturas mínimas nocturnas a consecuencia del calentamiento global son causantes de un descenso en el rendimiento en grano de un 10% por cada grado de aumento de dicha temperatura. En el Valle Medio del Ebro se dan unos gradientes térmicos en la fase de llenado del grano que en principio deben permitir la consecución de un grano de buena calidad.

Existen diferencias entre variedades de arroz que se expresan en el tamaño y forma del grano, calidad del mismo, etc. Los granos de arroz tienen una longitud que varía de 3,5 a 8 mm, anchura de 1,7 a 3 mm y grosor de 1,3 a 2,3 mm, y se clasifican en tres tipos en función de su tamaño: grano largo, grano semilargo y grano redondo o corto. El arroz de grano largo es 3 veces más largo que ancho (longitud del grano de 7 a 8 mm). En general, cuando se cuece es ligero, no se pega y se separa fácilmente, aunque también existen los arroces glutinosos de grano largo en Laos y Tailandia (generalmente tipo Índica). El arroz de grano medio o semilargo es entre 2 y 3 veces más largo que

ancho (longitud de unos 6,6 mm), más corto y más grueso que el arroz de grano largo. El arroz de grano corto o redondo es más corto que los anteriores (5,5 mm de largo y 2,5 mm de grosor) (Martin *et al.*, 1976). Estos dos últimos tipos de grano suelen ser de tipo Japónica.

Antes de llegar al consumidor, el grano que se obtiene en la cosechadora, el arroz cáscara, sufre una serie de procesos abrasivos para eliminar las envolturas florales y las capas celulares externas. Durante estos procesos se puede producir la rotura de granos. Al final del proceso industrial el peso inicial de grano de arroz cáscara se suele repartir aproximadamente en 70% de granos enteros y partidos, 10% de harina y 20% de cascarilla. Un arroz cáscara se considera de mayor calidad cuanto mayor es el número de granos enteros. Por ello, el objetivo de la industria arrocera y del agricultor es obtener el máximo rendimiento en granos enteros, llamado rendimiento industrial (Tinarelli, 1989).

Por todo ello, vistas las diferencias varietales existentes y su respuesta a distintas condiciones ambientales y culturales, y debido a la falta de información existente en la zona de estudio, es de interés conocer cómo se adaptan las variedades cultivadas en España a un nuevo sistema de riego. Por tanto, el objetivo de este capítulo es estudiar el comportamiento agronómico, en riego por aspersión, de las variedades más cultivadas en España y clasificarlas según sus posibilidades de cultivo bajo aspersión en las condiciones climatológicas del Valle Medio del Ebro.

IV.2. MATERIAL Y MÉTODOS.

IV.2.1. Localización del ensayo.

El ensayo de campo se realizó en el año 2001 en la finca experimental del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) del Gobierno de Aragón, en Montañana (Zaragoza). Las características de emplazamiento del ensayo, el clima y el suelo han sido descritas anteriormente en el Capítulo III.

IV.2.2. Diseño experimental. Variedades.

Se estudió el comportamiento agronómico de 14 variedades de arroz bajo riego por aspersión. El diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones. En la Tabla IV.1 se detalla el nombre de las variedades y el peso de mil semillas, separadas en función del tipo de grano de las mismas. Dicho peso sirvió para calcular la dosis de siembra.

El tamaño de la parcela elemental fue de 15 m x 1,25 m. Cada parcela tenía 6 líneas de plantas a una distancia entre líneas de 20 cm.

Tabla IV.1. Tipo de grano, subespecie y peso de mil semillas de las variedades del ensayo, agrupadas según el tipo de grano.

Nombre de la variedad	Tipo de grano	Subespecie	Peso de mil semillas (g)
Alena	Largo	Índica	26,4
Doñana			24,3
Gladio			23,7
Puntal			23,2
Thaibonnet			26,6
Guadiamar	Semilargo	Japónica	24,2
Lido			25,0
Loto			30,8
Thainato			27,6
Balilla x Sollana	Redondo	Japónica	29,3
Ganao			36,9
Guara			34,4
Puebla			36,4
Senia			31,0

IV.2.3. Prácticas culturales.

La siembra se efectuó el 17 de mayo de 2001, utilizando una sembradora de ensayos tipo Øyjord (Wintersteiger, Ried, Austria) (Figura IV.1). Esta sembradora permite sembrar superficies muy reducidas, así como ajustar de forma muy precisa la dosis de siembra, distancia entre líneas y profundidad de siembra. Las 14 variedades se sembraron a una densidad de siembra de 300 semillas m^{-2} y a una profundidad de 3-5 cm.



Figura IV.1. Imágenes de la sembradora de ensayos tipo Øyjord (Wintersteiger, Ried, Austria).

El riego se realizó con un sistema fijo de aspersión, con los aspersores a un marco rectangular de 15 m x 15 m y una altura de 1,5 m. Los aspersores (modelo RC130 de Riegos Costa, Lérida, España) disponían de dos boquillas de 4,4 mm y 2,4 mm de diámetro interior. Se aplicaron 49 riegos con una dosis estacional de 774 mm, dándose el primer riego el 21 de mayo y el último el 18 de septiembre, con una frecuencia de 2-3 riegos semanales. La pluviometría

media de los aspersores fue de 7,5 mm h⁻¹. La lluvia durante el ciclo de cultivo del arroz en la campaña de 2001 ascendió a 128 mm.

El abonado de fondo en presiembra se realizó el 25 de abril, con un complejo 8 (N)-15 (P₂O₅)-15 (K₂O), a razón de 670 kg ha⁻¹. Se hicieron dos aplicaciones en cobertera de 50 kg N ha⁻¹ cada una en forma de nitrato amónico (33,5% de N), el 11 de junio (comienzo del ahijado del arroz) y el 10 de julio (pleno ahijado del arroz).

Se realizaron dos tratamientos herbicidas. El primero de ellos, aplicado en postemergencia temprana (arroz en 2-3 hojas) el 4 de junio, consistió en propanil 35% (Khiumo 35 EC, Riceco) a una dosis de 10 L ha⁻¹. El segundo tratamiento se realizó en postemergencia tardía el 2 de julio, tratamiento que consistió en la aplicación de bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf), a una dosis de 4 L ha⁻¹.

La cosecha se realizó en dos partes. En primer lugar, el 28 de octubre se recolectó a mano la biomasa aérea en 1 m² de superficie en el centro de cada parcela, utilizándose dichas plantas para estudiar los caracteres de cada una de las variedades y para determinar los componentes del rendimiento. El resto de la parcela se cosechó el día siguiente utilizando una cosechadora de ensayos Hege 125 B (Hans-Ulrich Hege, Waldenburg, Alemania), con una anchura de corte de 1,25 m.

IV.2.4. Medidas experimentales.

Desarrollo del cultivo.

Nascencia: El 5 de junio se contó el número de plantas nacidas por metro lineal en las dos líneas centrales de cada parcela elemental.

Se hizo un seguimiento de las principales fases de desarrollo fenológico del cultivo según los siguientes estadios: 1^{er} tallo de ahijamiento, Ahijamiento activo, Fin de ahijamiento, Encañado, Formación de la panícula, Espiga en zurrón, Floración, Grano lechoso, Grano pastoso, Grano vítreo y Maduración completa. Se consideró que una parcela elemental se encontraba en un determinado estadio cuando el 50% de las plantas lo alcanzaba.

Biomasa: A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron dos muestreos en los que se segaron las plantas a ras de suelo en una de las repeticiones. El primer muestreo se hizo el 25 de julio en ahijamiento segándose las plantas en una longitud de 0,6 m en uno de los surcos centrales de la parcela. El segundo muestreo se realizó en el momento de la recolección, el 28 de octubre; segándose las plantas de 1 m lineal de los seis surcos (1,25 m²) de cada una de las parcelas. Las plantas recolectadas se secaron en estufa a 60°C hasta peso constante.

Rendimiento y sus componentes.

Rendimiento: El grano obtenido de cada parcela (el procedente de la muestra de un metro lineal segada a mano más el resto de la parcela cosechado a máquina) se pesó y se transformó a kg ha^{-1} , obteniendo así el rendimiento. Tras la determinación de la humedad del grano, el rendimiento de todas las parcelas se transformó a humedad uniforme del 14%.

Índice de cosecha: Se determinó en el muestreo realizado para la biomasa en el momento de la recolección. Se calculó como el cociente entre el rendimiento en grano y la biomasa total aérea secos.

Número de granos: Se tomaron 40 panículas de una de las repeticiones y se contaron el número de granos llenos y vacíos y se pesaron.

Calidad del grano.

Peso de mil granos (PMG): Del grano recolectado con la cosechadora se tomó una muestra en la cual se contaron mil granos utilizando un contador de granos NUMIGRAL (Tripette et Renaud, París, Francia), que se pesaron.

Peso por hectolitro (PHL): También llamado densidad aparente, expresa el peso del grano por unidad de volumen (kg hL^{-1}). Para su medida se utilizó un medidor de humedad y peso por hectolitro AQUASEARCH 600 (Kett Electric Laboratory, Tokio, Japón).

Calibre: De cada una de las variedades se pesó una muestra y se introdujo en un Clasificador de granos de laboratorio SORTIMAT (Pfeuffer, Kitzingen, Alemania), aparato calibrador de granos que los separa en función de la anchura y grosor del grano, utilizando cribas con ranuras rectangulares de 24 mm de longitud y de 2,8, 2,5, 2,2 y <2,2 mm de anchura. El grano de la muestra se clasificó según calibre, se pesó y se calculó el porcentaje obtenido de cada calibre sobre el peso total de la muestra.

Rendimiento industrial: Es el porcentaje de grano entero obtenido después del proceso de elaboración en la industria, tras el descascarillado y pulido. Para su medida se pesó la muestra y se pasó 2 veces por el descascarador SATAKE THU 35B (Satake Engineering Co. Ltd., Japón). A continuación se pasó por la pulidora SATAKE TM 05 (Satake Engineering Co. Ltd., Japón) y por el separador de arroz partido HAWK WFD 300 105 (ILPERSA, Sueca, Valencia). Por último se pesó el grano entero. La valoración del rendimiento industrial se realizó en la Cooperativa Agraria San Miguel Arcángel de Valareña, Zaragoza. Los valores corresponden a la media de dos parcelas del ensayo. En algunas variedades en que el grano estaba demasiado verde no se pudo valorar.

IV.2.5. Análisis estadístico.

El análisis estadístico se realizó, para las variables que se midieron en las tres repeticiones, mediante análisis de varianza (ANOVA). En aquellas varia-

bles en que dicho análisis resultó significativo se realizó la comparación de medias con el test de Duncan con un nivel de significación de $\alpha=0,05$. Se analizó la relación de la precocidad del espigado (días de siembra a espigado) sobre la biomasa aérea, el rendimiento en grano, el porcentaje de granos vacíos y el PHL mediante análisis de regresión lineal. Se estudiaron también las relaciones del rendimiento en grano con el IC, el número de granos por panícula, el porcentaje de granos vacíos, el PMG y el ratio longitud:anchura mediante análisis de regresión lineal. La significación de las regresiones se indica como *: $p<0,05$; **: $p<0,01$, ***: $p<0,001$ y ****: $p<0,0001$. El programa empleado fue STATGRAPHICS Plus 5.0.

IV.3. RESULTADOS.

IV.3.1. Desarrollo del cultivo.

La densidad de plantas a los 19 días después de la siembra fue, en general, baja (Tabla IV.2) en comparación con la dosis de siembra (300 semillas m^{-2}). Aunque la emergencia en condiciones de campo es algo inferior y más lenta que la obtenida en laboratorio, la variedad en la que la emergencia fue mayor sólo superó muy ligeramente el 50% del porcentaje de germinación obtenido en laboratorio.

Tabla IV.2. Valores medios de la densidad de plantas el 5 de junio de 2001 (19 días tras la siembra) y número de días desde siembra a espigado.

Variedad	Densidad de plantas ($N^{\circ} m^{-2}$)		Días de siembra a espigado	
<i>Grano Largo</i>				
Alena	155	bc	128	f
Doñana	120	ab	128	f
Gladio	147	bc	123	e
Puntal	159	bc	132	g
Thaibonnet	117	a	128	f
<i>Media</i>	<i>140</i>		<i>128</i>	
<i>Grano Semilargo</i>				
Guadamar	169	bc	113	c
Lido	157	bc	111	b
Loto	170	bc	102	a
Thainato	130	abc	113	c
<i>Media</i>	<i>156</i>		<i>110</i>	
<i>Grano Redondo</i>				
Balilla x Sollana	189	c	116	d
Ganao	79	a	102	a
Guara	122	ab	111	b
Puebla	154	bc	123	e
Senia	154	bc	116	d
<i>Media</i>	<i>140</i>		<i>114</i>	

Para cada variable, valores con la misma letra no difieren significativamente ($p<0,05$).

La densidad de plantas emergidas de las 14 variedades mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) (Tabla IV.2). Las variedades que tuvieron una menor densidad de plantas fueron Ganao, Thaibonnet, Guara y Doñana. La variedad que tuvo una mayor densidad de plantas fue Balilla x Sollana. Esta diferencia en la densidad de plantas pudo tener consecuencia en los resultados de otros caracteres medidos posteriormente. En cualquier caso, la variedad Ganao, que tuvo un menor número de plantas nacidas por m^2 en el momento del conteo, fue la que dio un mayor rendimiento. No se observaron diferencias en la densidad de plantas nacidas entre los distintos tipos de variedades.

Los genotipos estudiados mostraron distinta precocidad. Las variedades más precoces fueron Ganao y Loto, seguidas de las variedades Lido y Guara (Tabla IV.2). Las más tardías fueron Alena, Doñana, Thaibonnet y Puntal, con más de 4 meses desde siembra a espigado. Los resultados indican que hubo diferencias máximas de precocidad de 30 días entre las variedades estudiadas en el ensayo de aspersión. En promedio se observó que las variedades de grano largo eran las de ciclo más largo y las de grano semilargo eran las más precoces.

En la Figura IV.2 se ha representado la evolución de las temperaturas mínimas diarias y la fecha de espigado de las distintas variedades ensayadas. Durante el mes de agosto hubo algún día con bajadas de temperatura, de corta duración, por debajo de los 15°C . En ningún momento la temperatura descendió por debajo de los 15°C en el período comprendido entre el 22 y el 30 de agosto. Durante todo el mes de septiembre la temperatura mínima diaria se mantuvo por debajo del umbral de 15°C . El 2 de septiembre la temperatura mínima alcanzó un mínimo de $8,3^{\circ}\text{C}$. A partir del 11 de septiembre los valores de la temperatura mínima fueron más bajos, lo cual es indicativo de que el tiempo en que la temperatura del aire quedó por debajo del umbral fue bastante más largo, descendiendo a niveles que claramente afectaron a la fecundación y cuajado de las variedades de ciclo más largo, que en esos momentos estaban espigando.

De los dos muestreos de biomasa aérea realizados (Tabla IV.3), en el primero de ellos, efectuado en pleno ahijado, Lido y Gladio fueron respectivamente las variedades con mayor y menor biomasa aérea, mientras que en el segundo muestreo, realizado en cosecha, las de mayor y menor biomasa aérea fueron Senia y Doñana, respectivamente. No hubo una correlación significativa entre la biomasa aérea de los dos muestreos, lo cual indica que no se puede prever el valor de biomasa aérea en cosecha con los datos de biomasa aérea en ahijado. En general, se observó que las variedades de grano largo produjeron una menor biomasa que las de grano redondo y semilargo. Las variedades de grano redondo fueron las que produjeron una mayor biomasa en cosecha.

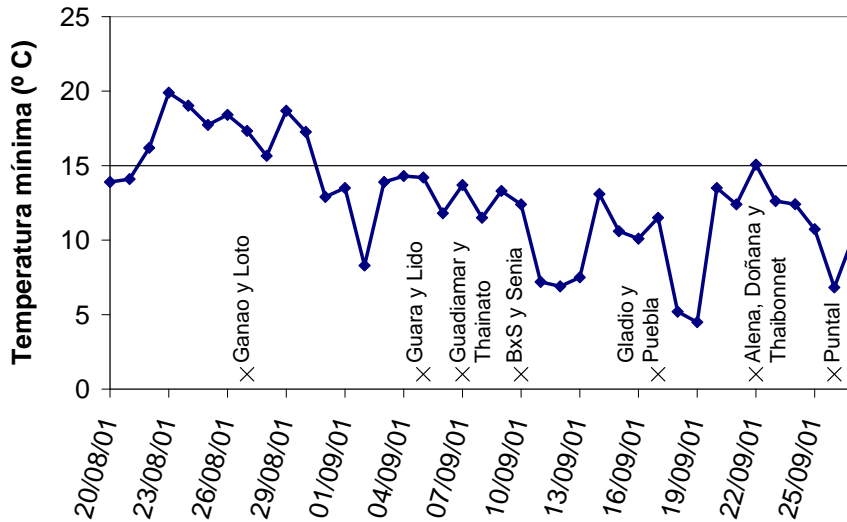


Figura IV.2. Valores diarios de la temperatura mínima y fecha de espigado (X) de las distintas variedades en la campaña de 2001.

Tabla IV.3. Biomasa aérea de cada una de las variedades en las fases de ahijado y en cosecha.

Variedad	Biomasa aérea (kg ha ⁻¹)	
	En ahijado	En cosecha
<i>Grano Largo</i>		
Alena	1.220	9.301
Doñana	833	7.978
Gladio	695	10.039
Puntal	797	10.956
Thaibonnet	1.279	10.768
<i>Media</i>	<i>965</i>	<i>9.808</i>
<i>Grano Semilargo</i>		
Guadiamar	1.286	13.302
Lido	1.804	12.208
Loto	1.429	10.922
Thainato	1.222	13.459
<i>Media</i>	<i>1.435</i>	<i>12.478</i>
<i>Grano redondo</i>		
Balilla x Sollana	1.349	13.703
Ganao	1.430	12.838
Guara	1.158	12.072
Puebla	1.573	14.250
Senia	1.080	14.708
<i>Media</i>	<i>1.318</i>	<i>13.514</i>

Por otra parte, existió una relación negativa entre la biomasa en ahijado y la duración del periodo de siembra a espigado, indicando que aquellas varieda-

des que en el ahijado tenían mayor biomasa alcanzaron antes el espigado (Figura IV.3).

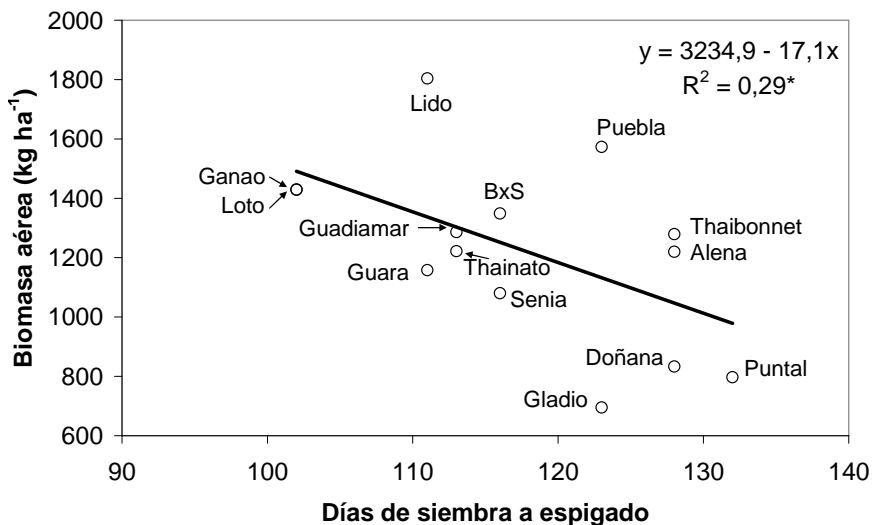


Figura IV.3. Relación entre la biomasa aérea en ahijado y el número de días de siembra a espigado.

IV.3.2. Rendimiento y sus componentes.

- Rendimiento

El rendimiento medio en grano, referido al 14% de humedad, varió entre 1.397 kg ha⁻¹ para la variedad Doñana y 5.815 kg ha⁻¹ para la variedad Ganao (Tabla IV.4). Las variedades Ganao y Puebla fueron las únicas que superaron las 5 t ha⁻¹, siendo las más productivas junto a Loto, Thainato y Guadamar, con un rendimiento medio superior a las 4 t ha⁻¹. Por el contrario, las variedades menos productivas fueron Thaibonnet, Gladio, Puntal, Alena y Doñana, con rendimientos medios inferiores a las 3 t ha⁻¹.

Se observó una relación clara entre la precocidad y el rendimiento, de manera que las variedades de ciclo más largo resultaron ser las menos productivas (Figura IV.4), existiendo una pendiente negativa de la relación lineal entre ambas variables altamente significativa ($p < 0,001$).

- Índice de cosecha

Los valores del IC fueron bajos (de 0,10 a 0,31), con diferencias significativas entre variedades (Tabla IV.4). El valor más alto se obtuvo en la variedad Thainato con un valor de 0,31, seguida de la variedad Ganao (0,30). La variedad con el menor índice de cosecha fue Doñana (0,10). Existió una clara relación entre el índice de cosecha y el rendimiento (Figura IV.5).

Tabla IV.4. Rendimiento en grano e índice de cosecha (IC) según la variedad.

Variedad	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		IC	
<i>Grano Largo</i>				
Alena	1496	g	0,13	efg
Doñana	1397	g	0,09	g
Gladío	2287	efg	0,22	abcd
Puntal	1954	fg	0,11	fg
Thaibonnet	2858	defg	0,19	cdef
<i>Grano Semilargo</i>				
Guadamar	4215	abcd	0,26	abcd
Lido	3877	bcde	0,21	bcde
Loto	4845	abc	0,28	abcd
Thainato	4331	abcd	0,31	a
<i>Grano Redondo</i>				
Balilla x Sollana	3276	cdef	0,18	defg
Ganao	5815	a	0,30	ab
Guara	3821	bcde	0,22	abcd
Puebla	5543	ab	0,28	abc
Senia	3721	bcdef	0,20	cdef
<i>Media</i>	3531		0,21	
<i>Desviación estándar</i>	553		0,03	
<i>CV (%)</i>	44		37	

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$).

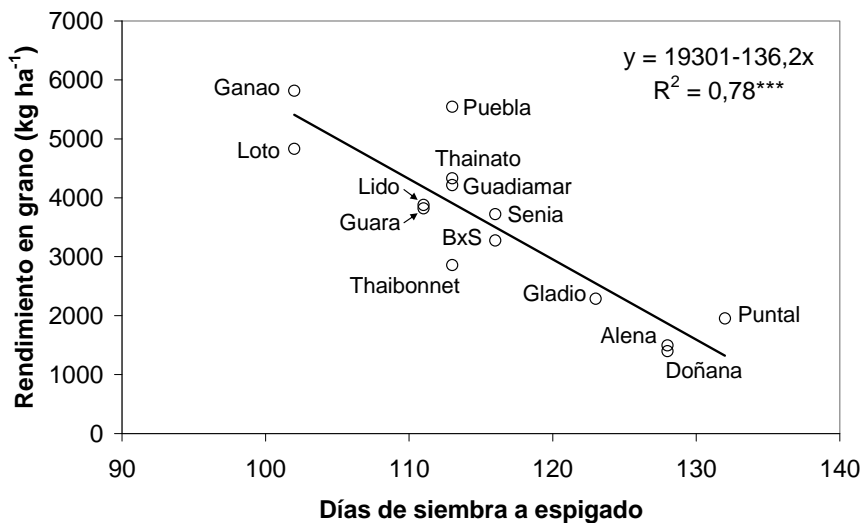


Figura IV.4. Relación entre el rendimiento en grano y el número de días desde siembra a espigado.

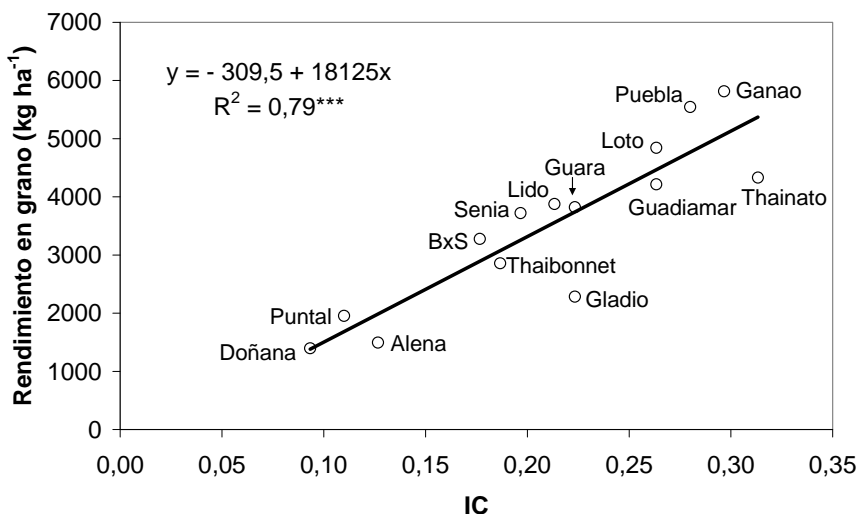


Figura IV.5. Relación entre el rendimiento en grano y el índice de cosecha (IC).

- Componentes del rendimiento: n° de panículas, n° de granos por panícula y peso de mil granos

El número de panículas por m², el número total de granos por panícula y el porcentaje de granos vacíos mostraron una gran variabilidad (Tabla IV.5), llegando a un coeficiente de variación (CV) del orden del 40%. El valor medio del número de panículas por m² fue de 374 con un valor mínimo de 254 en la variedad Puntal y un máximo de 549 en la variedad Puebla. Las variedades de grano semilargo mostraron en promedio un mayor densidad de panículas mientras que las variedades de grano largo mostraron en promedio una menor densidad de panículas. El valor medio del número total de granos por panícula fue de 71, con una variabilidad media (CV = 23%) mostrando las variedades de grano largo un mayor número de granos por panícula. El número de granos potenciales por m² (suma de granos llenos y vacíos) osciló entre los 20.400 de Ganao y los 32.320 de Loto, siendo en promedio menor en las variedades de grano redondo.

Tabla IV.5. Densidad de panículas, número total de granos por panícula, número potencial de granos por m², porcentaje de granos vacíos y peso de mil granos (PMG).

Variedad	Panículas* (N° m ⁻²)	Granos* (N° panícula ⁻¹)	Granos* (N° m ⁻²)	Granos vacíos* (%)	PMG* (g)
<i>Grano Largo</i>					
Alena	250	104	26.000	79	19,1
Doñana	442	68	30.056	85	17,5
Gladío	341	80	27.280	47	20,1
Puntal	254	98	24.892	65	18,2
Thaibonnet	362	64	23.168	51	21,6
<i>Grano Semilargo</i>					
Guadamar	427	66	28.182	33	19,7
Lido	513	48	24.624	18	20,6
Loto	505	64	32.320	25	25,4
Thainato	300	75	22.500	23	24,6
<i>Grano Redondo</i>					
Balilla x Sollana	272	75	20.400	51	24,7
Ganao	255	81	20.655	14	31,7
Guara	390	61	23.790	39	25,3
Puebla	549	41	22.509	33	26,7
Senia	370	70	25.900	55	24,6
<i>Media</i>	<i>374</i>	<i>71</i>	<i>25.163</i>	<i>44</i>	<i>22,8</i>
<i>CV (%)</i>	<i>26</i>	<i>23</i>	<i>13</i>	<i>48</i>	<i>17</i>

* Cada valor corresponde a la media de 40 panículas en la última repetición.

El valor medio del porcentaje de granos vacíos fue del 44% con un CV del 48%. El porcentaje de granos vacíos fue mucho mayor en las variedades de grano largo (65% en promedio) y el menor valor se observó en las variedades de grano semilargo (25% en promedio). La variedad Ganao fue la que mayor porcentaje de granos llenos tenía (86%), seguida de Lido, Loto y Thainato, todas ellas con un porcentaje de granos llenos superior al 70%. Por el contrario, Doñana y Alena fueron las variedades con un peor cuajado.

El valor medio del peso de mil granos fue de 22,8 g, este último carácter con una variabilidad más moderada (CV = 17%). Ganao fue la variedad que presentó un mayor valor (31,7 g), seguida de Puebla. En el otro extremo, Doñana fue la variedad con menor peso del grano (17,5 g). Ganao fue a la vez la variedad que tenía mayor número de granos llenos por panícula y mayor peso individual de grano si bien el número de granos potenciales fue el menor de todos.

El porcentaje de granos vacíos aumentó de forma importante al aumentar el número de días de siembra a espigado (Figura IV.6). Una diferencia de 30 días a espigado cuadruplicó el porcentaje de granos vacíos.

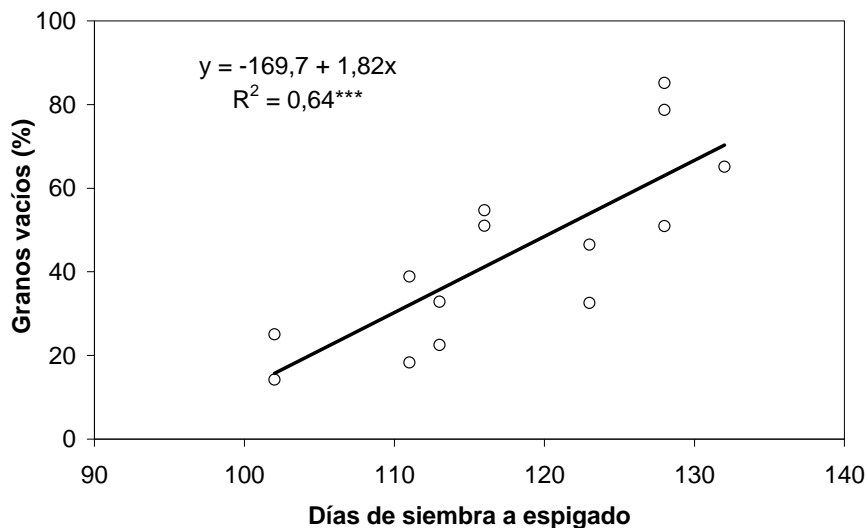


Figura IV.6. Relación entre el porcentaje de granos vacíos por panícula y el número de días desde siembra a espigado. *Cada punto corresponde a una de las variedades estudiadas.*

Las Figuras IV.7 a IV.9 presentan la relación entre el rendimiento en grano y los componentes del rendimiento. Existe una débil correlación negativa entre el rendimiento en grano y el número de granos por panícula (Figura IV.7). Este resultado puede parecer contradictorio pero es debido a que las variedades que han presentado un mayor número de granos por panícula también han tenido un mayor porcentaje de granos vacíos que no han contribuido al rendimiento. Esto queda claro en la Figura IV.8, donde se observa que los rendimientos más altos estuvieron relacionados con un menor porcentaje de granos vacíos. Asimismo se ha observado un aumento lineal del rendimiento al aumentar el peso de mil granos (Figura IV.9). Por el contrario, no se ha encontrado relación entre la densidad de plantas o de panículas con el rendimiento en grano.

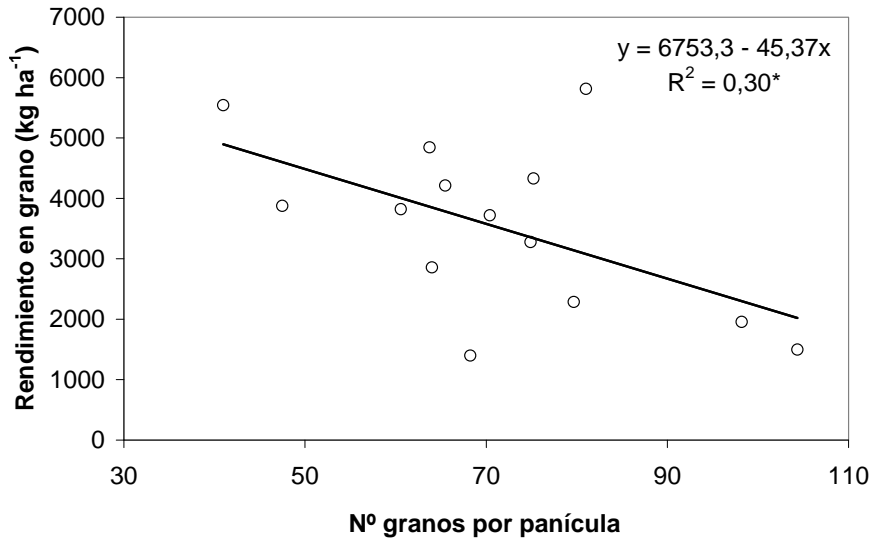


Figura IV.7. Relación entre el rendimiento en grano y el total de granos formados por panícula. Cada punto corresponde a una de las variedades estudiadas.

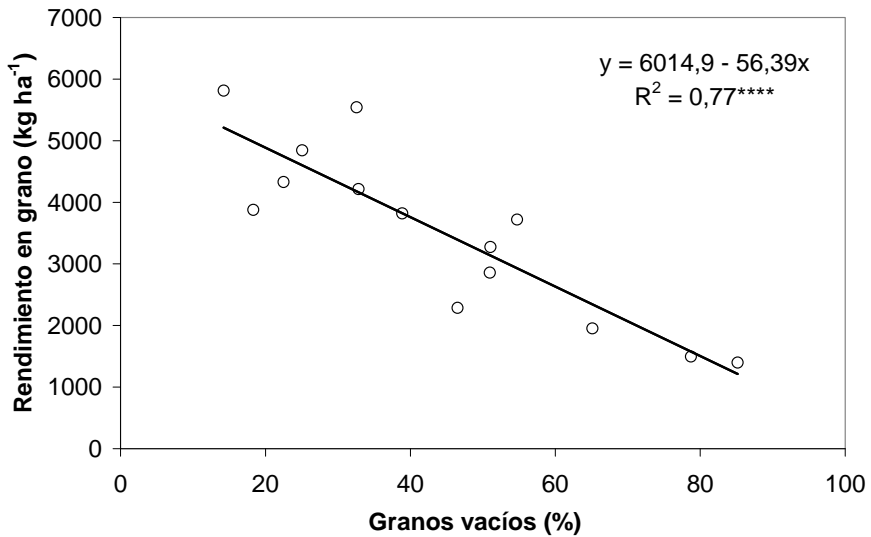


Figura IV.8. Relación entre el rendimiento en grano y el porcentaje de granos vacíos por panícula. Cada punto corresponde a una de las variedades estudiadas.

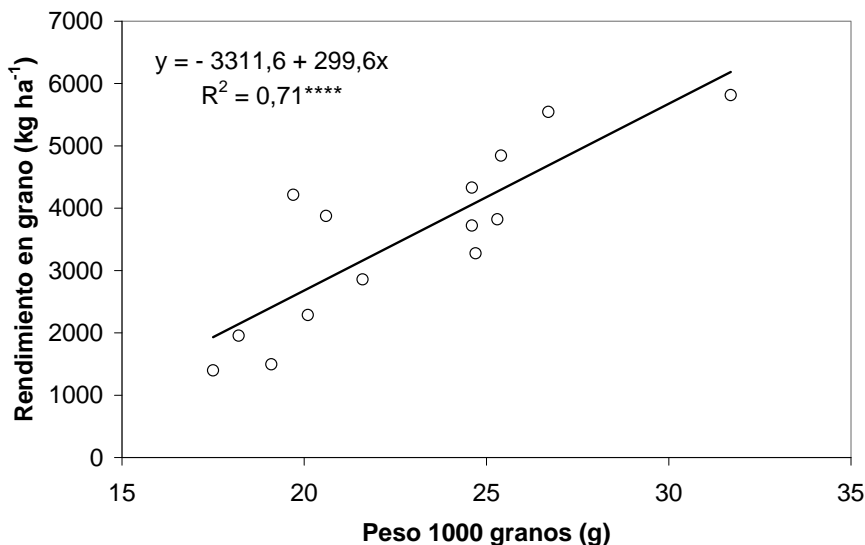


Figura IV.9. Relación entre el rendimiento en grano y el peso de mil granos de la muestra de 40 panículas. Cada punto corresponde a una de las variedades estudiadas.

La Tabla IV.6 presenta los valores medios de los rendimientos en grano y de los componentes del rendimiento de las variedades agrupadas según el tipo de grano de las mismas. El análisis de comparación de medias de estos grupos de variedades mostró diferencias significativas entre los rendimientos, IC y porcentaje de granos vacíos de variedades de grano largo con las de grano semilargo y redondo. El rendimiento en grano de las variedades de grano largo fue alrededor de la mitad del obtenido en las variedades de grano semilargo y redondo ($p < 0,001$). Las diferencias entre variedades de grano largo y las de grano semilargo y redondo, en el IC ($p < 0,001$) y porcentaje de granos vacíos ($p < 0,01$), son también importantes, del orden del 39% y 48% respectivamente. En cuanto al peso de mil granos, las variedades de grano redondo tuvieron un valor significativamente mayor que las variedades de los otros tipos de grano ($p < 0,01$).

Tabla IV.6. Relación entre el tipo de grano y el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) referido al 14% de humedad y los componentes del rendimiento.

Tipo de grano	Rendimiento (kg ha^{-1})	IC	Panículas ($\text{N}^\circ \text{m}^{-2}$)	Granos ($\text{N}^\circ \text{panícula}^{-1}$)	Granos ($\text{N}^\circ \text{m}^{-2}$)	Granos vacíos (%)	PMG (g)
Largo	1.998 b	0,15 b	330 a	83 a	26.279 a	65 a	19,3 b
Semilargo	4.317 a	0,26 a	436 a	63 a	26.907 a	25 b	22,6 b
Redondo	4.435 a	0,23 a	367 a	66 a	22.651 a	38 b	26,6 a

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$).

IV.3.3. Caracteres de calidad del grano obtenidos en la recolección con minicosechadora.

- *Peso de mil granos (PMG)*

En la recolección final hecha con minicosechadora de ensayos las variedades con mayor valor del peso de mil granos (PMG) fueron Ganao, Guara y Puebla, con 30,3, 30,2 y 29,9 g respectivamente. Las de grano más ligero fueron Alena y Doñana, cuyo PMG no alcanzó los 20 g (Tabla IV.7).

Tabla IV.7. Peso de mil granos (PMG), peso del hectolitro (PHL), porcentaje de peso de grano según su calibre y rendimiento industrial del grano recolectado con cosechadora.

Variedad	PMG (g)	PHL (kg hL ⁻¹)	Calibre (%)				Rendimiento industrial ^x (%)
			<2,2 mm	2,2-2,5 mm	2,5 -2,8 mm	>2,8 mm	
<i>Grano Largo</i>							
Alena	19,5	47,1 ef	80	20	0	0	-
Doñana	19,6	44,5 f	91	9	0	0	-
Gladio	21,0	50,5 cde	96	4	0	0	-
Puntal	19,8	47,4 ef	90	9	0	0	48 ef
Thaibonnet	20,5	48,0 def	85	14	1	0	47 f*
<i>Media</i>	<i>20,1</i>	<i>47,5</i>	<i>88</i>	<i>11</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	
<i>Grano Semilargo</i>							
Guadamar	20,7	56,5 a	44	54	2	0	68 a
Lido	21,8	56,0 ab	79	20	0	0	66 a
Loto	24,7	52,9 bc	82	18	0	0	54 cd
Thainato	26,4	59,0 a	14	81	4	1	67 a
<i>Media</i>	<i>23,4</i>	<i>56,1</i>	<i>55</i>	<i>43</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>64</i>
<i>Grano Redondo</i>							
BxS	24,5	50,0 cde	14	40	43	3	51 def*
Ganao	30,3	51,4 cd	6	36	50	8	52 de
Guara	30,2	52,2 c	14	40	44	2	63 ab
Puebla	29,9	51,5 cd	11	49	38	1	59 bc
Senia	26,7	48,2 def	18	53	28	1	-
<i>Media</i>	<i>28,3</i>	<i>50,7</i>	<i>13</i>	<i>44</i>	<i>41</i>	<i>3</i>	<i>58</i>
<i>Media</i>	<i>20,4</i>	<i>51,1</i>	<i>52</i>	<i>32</i>	<i>15</i>	<i>1</i>	<i>58</i>
<i>CV (%)</i>	<i>17</i>	<i>8</i>	<i>69</i>	<i>67</i>	<i>131</i>	<i>184</i>	<i>13</i>

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$).

^x En las variedades en que el grano estaba demasiado verde no se pudo valorar el rendimiento industrial. * Sólo hay datos de una repetición.

De acuerdo a los valores medios del peso de mil granos en cosecha (Tabla IV.6) las variedades estudiadas se podrían clasificar en 3 grupos:

- Ganao, Guara, y Puebla, las de mayor PMG, con valor igual o superior a 30 g.
- Senia, Thainato, Loto y Balilla x Sollana, tienen un PMG intermedio, entre 25 y 30 g.

- Lido, Gladio, Thaibonnet, Puntal, Doñana y Alena, fueron las de PMG más bajo, inferior a 25 g. Las dos últimas no alcanzaron los 20 g.

Estos resultados del PMG obtenidos en el grano cosechado con cosechadora son concordantes con los obtenidos en el muestreo de 40 panículas de cada variedad efectuado el 28 de octubre (Tabla IV.5). Existe una correlación estrecha y lineal entre el PMG estimado por los dos sistemas (Figura IV.10). Alguna variedad, sin embargo, presentó resultados algo divergentes como Guara y Puebla.

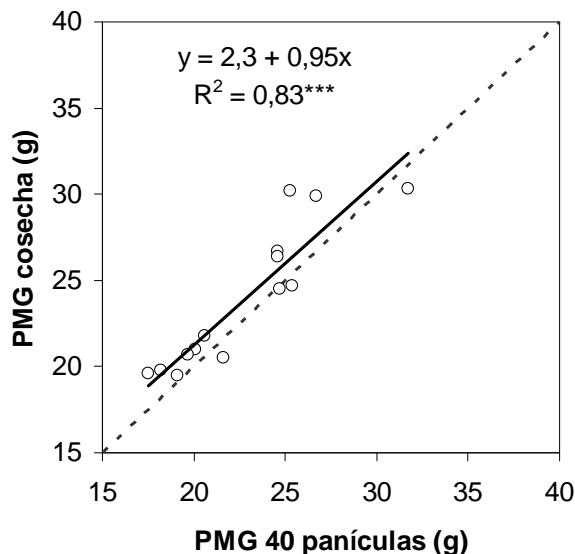


Figura IV.10. Relación entre los pesos de mil granos (PMG) de la cosecha mecánica con cosechadora y los de los muestreos manuales de 40 panículas el 28 de octubre de 2001. Cada punto corresponde a una de las variedades estudiadas.

- Peso por hectolitro (PHL)

El ANOVA mostró la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) en el peso por hectolitro (PHL) del grano de las diferentes variedades (Tabla IV.7). El PHL varió entre los 55-59 kg hL⁻¹ de Lido, Guadiamar y Thainato y los 45-48 kg hL⁻¹ de Senia, Thaibonnet, Puntal, Alena y Doñana.

Se encontró una correlación negativa entre el PHL y los días a espigado con un coeficiente de determinación de 0,41 ($p < 0,05$). Las ocho variedades de menor peso por hectolitro fueron, a su vez, las de ciclo más largo (Tabla IV.7 y Figura IV.11), con excepción de Puebla, que siendo de ciclo largo tuvo el sexto valor más alto de PHL.

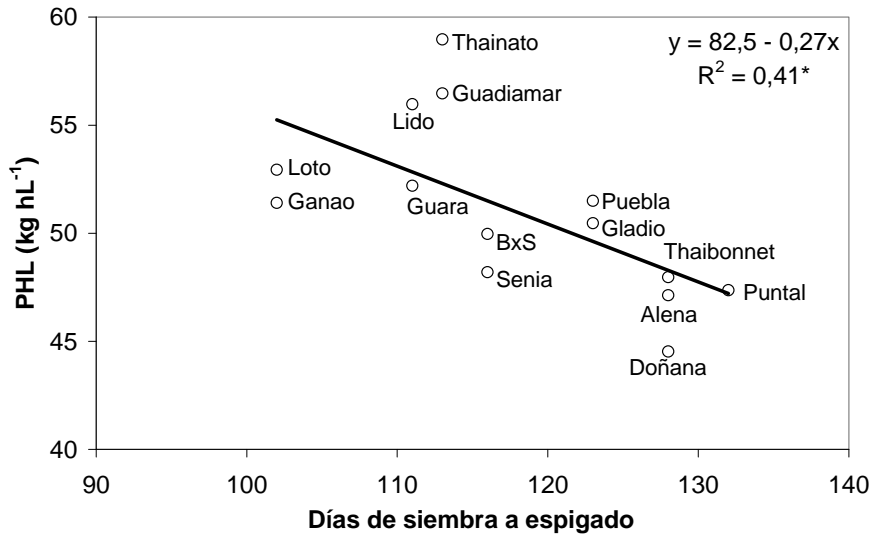


Figura IV.11. Relación entre el PHL del grano y el número de días de siembra a espigado.

- Calibre

La variedad Ganao fue la que presentó los granos de mayor calibre pues el 58% del peso correspondió a granos con calibre mayor de 2,5 mm. Balilla x Sollana y Guara presentaron también un calibre importante con más del 45% del peso correspondiente a granos que no pasaban por la criba de 2,5 mm (Tabla IV.7). En algunas variedades (Alena, Doñana, Gladío, Lido, Loto, Puntal y Thaibonnet) prácticamente el 100% de los granos pasaron por la criba de 2,5 mm. Los distintos grupos de variedades se distinguieron bien por su calibre: las de grano largo tuvieron en promedio el 89% de sus granos de calibre inferior a 2,2 mm; las de grano semilargo mostraron en promedio un porcentaje cercano al 50% de calibres inferior a 2,2 mm y calibres entre 2,2 y 2,5 mm; las de grano redondo tuvieron más de un 40% de granos con calibre mayor de 2,5 mm y solamente un 13% de granos con calibre menor de 2,2 mm.

Thaibonnet y Doñana fueron las variedades que tuvieron mayor longitud de grano, superando los 9 mm. Por el contrario Balilla x Sollana fue la de grano más corto, sin llegar a los 7 mm. Atendiendo a la anchura de grano, Ganao fue la variedad que presentó una mayor anchura (3,4 mm) y Doñana la de grano más estrecho (2 mm) (Figura IV.12).

De acuerdo con el porcentaje de grano que supera los 2,5 mm de anchura, se pueden establecer 3 grupos de variedades:

1. Variedades con más del 20% del grano con anchura >2,5 mm. Serían los granos redondos: Balilla x Sollana, Ganao, Guara, Puebla y Senia.
2. Variedades con porcentaje de granos con anchura >2,5 mm entre 0% y 20%. Serían los granos semilargos: Guadamar y Thainato.

3. Variedades en que todos los granos tienen anchura <2,5 mm. Son variedades de grano largo: Alena, Doñana, Gladio, Lido, Loto, Puntal y Thaibonnet.

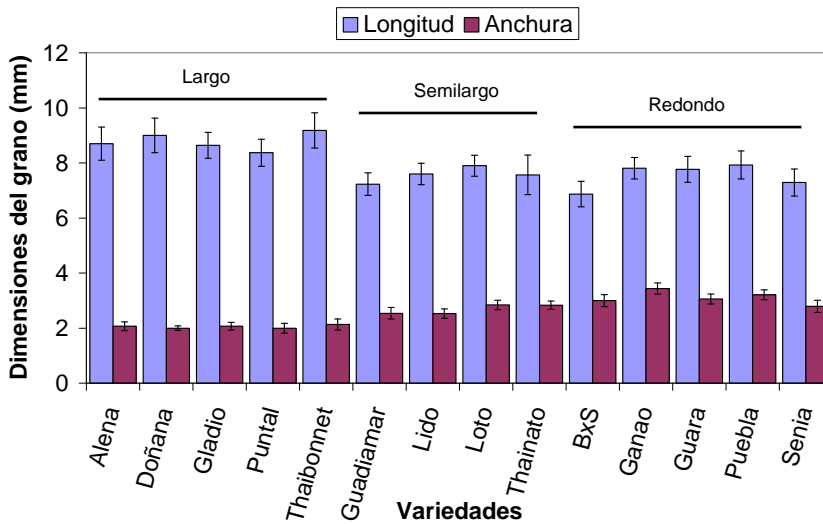


Figura IV.12. Dimensiones (longitud y anchura) de los granos de las variedades ensayadas. La línea vertical en la parte superior de las barras representa la desviación estándar.

Se encontró una relación lineal negativa entre el rendimiento en grano y la relación longitud/anchura del grano en las variedades estudiadas con un valor del coeficiente de determinación de 0,73 ($p < 0,001$). Cuanto mayor era la relación longitud/anchura, es decir el grano se aproximaba más al tipo largo, menor era el rendimiento en grano (Figura IV.13).

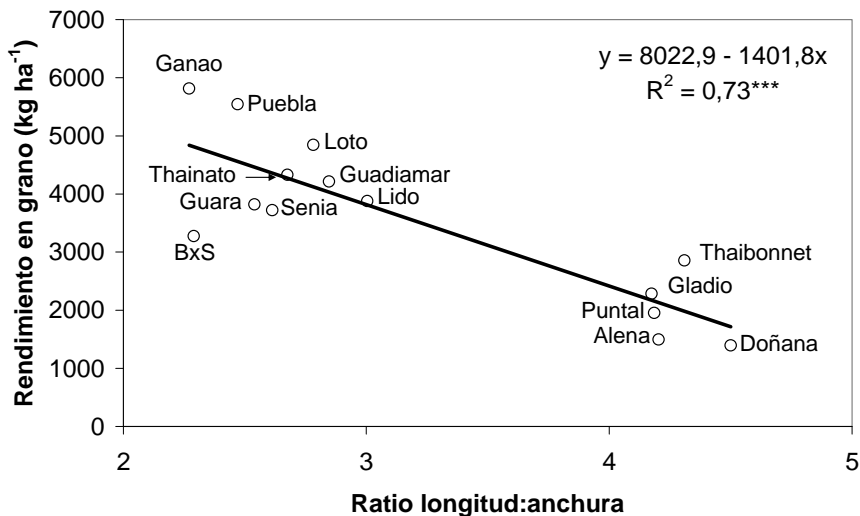


Figura IV.13. Relación entre el rendimiento en grano y el ratio longitud:anchura del grano.

- Rendimiento industrial

En algunas de las variedades, que corresponden con aquellas de ciclo más largo (Alena, Doñana, Gladio y Senia), no pudo realizarse el proceso de determinación del rendimiento industrial por estar el grano algo verde, con mayor humedad de la deseable para someter al grano a los procesos de descascari-lado. En la Tabla IV.7 se presentan los valores del rendimiento industrial obtenido en las variedades del ensayo en las que se pudo hacer esta determinación. Los valores corresponden a la media de dos parcelas del ensayo.

Los valores de rendimiento industrial variaron entre el 70% y el 45%. Guadamar presentó el mayor rendimiento (68%) y Thaibonnet el menor (47%) (Tabla IV.6).

La relación entre el rendimiento industrial y la longitud del grano para las variedades en que pudo hacerse la valoración del rendimiento industrial mos-tró que el rendimiento industrial disminuyó al aumentar la longitud del grano (Figura IV.14), con la excepción de Balilla x Solana.

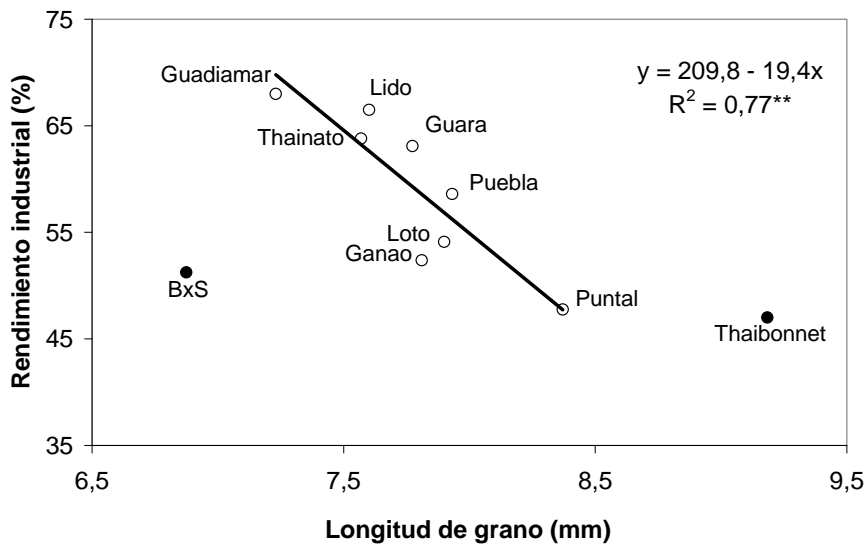


Figura IV.14. Relación entre el rendimiento industrial y la longitud del grano de arroz. *Los círculos rellenos en negro representan las variedades de las que sólo hay datos de una repetición y que no se han considerado en la regresión lineal.*

IV.4. DISCUSIÓN.

Aunque no se ha llegado a cuantificar en este ensayo, sí se ha podido observar lo manifestado por Blackwell *et al.* (1985), que indican que cuando el arroz se riega por aspersión, la emergencia de las plántulas es más lenta y tarda más tiempo en cubrir el terreno que en el cultivo con riego por inunda-

ción, lo cual supone una menor interceptación de radiación solar con el consiguiente menor rendimiento (Boonjung y Fukai, 1996).

Dada la escasez de trabajos semejantes al desarrollado en esta tesis, no hay mucha información con la que poder contrastar los resultados obtenidos. Al ser esta técnica nueva, las dificultades han ido apareciendo desde el inicio de los ensayos. Así, la densidad de plantas nacidas cuando se realizó el conteo resultó más baja de lo esperada, pues aunque la emergencia en condiciones de campo es algo inferior y más lenta que la obtenida en laboratorio, la variedad en la que la emergencia fue mayor sólo superó ligeramente el 50% del porcentaje de germinación obtenido en laboratorio. Esto podría achacarse a que, posiblemente, en la fecha en que se realizó el conteo de plantas (19 días después de la siembra) la nascencia no se había producido de forma completa, así como a que el suelo de la parcela tenía una cierta salinidad ($CE_e = 5,5 \text{ dS m}^{-1}$), superior al umbral de 3 dS m^{-1} establecido por Ayers y Westcot (1985) para el arroz, que provocaría un descenso de rendimiento de al menos un 25% (Ayers y Westcot, 1985). Las diferencias observadas entre variedades en cuanto a la densidad de plantas nacidas pudieron tener consecuencia en los resultados de otros caracteres medidos posteriormente, si bien es conocida la gran capacidad de ahijado del arroz. Así, Ganao, la variedad con menor densidad de plantas nacidas resultó ser la que dio mayor rendimiento.

En cuanto a la precocidad de las variedades estudiadas para llegar a espigado, las diferencias de hasta 30 días podrían explicar que las de ciclo más largo tuvieran dificultades para cubrir su ciclo vegetativo en nuestras condiciones climáticas, lo que se tradujo en los bajos rendimientos obtenidos con estas variedades. Cuando se comparan estos resultados con los obtenidos el mismo año en riego por inundación en Navarra (Bozal *et al.*, 2002) y asumiendo que las condiciones meteorológicas en ambas localidades del Valle del Ebro han sido parecidas, el ciclo parece alargarse cuando se riega por aspersión, entre 9 y 24 días para las mismas variedades: Ganao, Gladio, Guadiamar, Lido y Puebla. Esto concuerda con los datos obtenidos por otros autores que indican que cuando el arroz se cultiva bajo riego por aspersión la floración se retrasa (Dabney y Hoff, 1989; Muirhead *et al.*, 1989), aunque el periodo desde floración a madurez se acorta (Spanu *et al.*, 1989). Este retraso en la floración aumenta la probabilidad de que se produzcan temperaturas nocturnas bajas durante el periodo de floración como ocurrió en nuestros ensayos, que dan lugar a una disminución del rendimiento (Muirhead *et al.*, 1989). Por ello, las variedades de ciclo más corto, que se corresponden con variedades de grano semilargo y redondo, parecen tener un rendimiento mayor en aspersión, como se ha observado en algunas zonas de Italia (Guiducci *et al.*, 1999). En Extremadura, la variedad con mayor rendimiento fue Thaibonnet (Batalla, 1999), pero su ciclo resulta excesivamente largo para las condiciones climáticas de Aragón. En los trabajos de Westcott y Vines (1986) y Dabney y Hoff (1989) las diferen-

cias de rendimiento en relación con la fecha de espigado se debieron a la distinta susceptibilidad de las diferentes variedades a enfermedades fúngicas.

Al cotejar los datos del ensayo de esta tesis en Zaragoza con los obtenidos en la misma campaña y con el mismo sistema de riego por aspersión en Cerdeña (Italia) por Spanu y Murtas (2002) se observan claras diferencias en las tres variedades comunes: Loto, Gladio y Thaibonnet, con una duración de siembra a espigado de 16 a 24 días menos en Italia que en nuestro ensayo, debido probablemente a unas condiciones climáticas menos limitantes para el cultivo del arroz que las del Valle Medio del Ebro. En cualquier caso, las variedades de ciclo más largo también fueron las que mostraron una menor biomasa en ahijado, por lo que sus menores rendimientos parecen debidos a una menor adaptación general a las condiciones climáticas de Aragón. El hecho de que las variedades de ciclo más largo resultaran ser las de menor rendimiento indica que en las condiciones climáticas del Valle Medio del Ebro la integral térmica no permite un adecuado desarrollo de las mismas con esta técnica de cultivo. De hecho estas variedades de ciclo más largo son las más cultivadas en Andalucía, donde están perfectamente adaptadas a condiciones climáticas más cálidas. Una forma de soslayar este problema sería adelantar la fecha de siembra (Slaton *et al.*, 2003). Sin embargo, los resultados del ensayo de variedades han mostrado que cinco variedades de ciclo más corto han tenido un rendimiento aceptable, por lo cual se dispone de un número suficiente de variedades para el desarrollo de esta técnica de cultivo.

La relación observada entre rendimiento e índice de cosecha indica que el periodo de fecundación y cuajado del grano es fundamental para obtener rendimientos aceptables.

Es de remarcar la existencia de una relación significativa entre el porcentaje de granos vacíos y el número de días de siembra a espigado. La explicación a esta relación puede ser la existencia de condiciones meteorológicas desfavorables o menos idóneas para un buen desarrollo de la floración y del cuajado, que se tradujo posteriormente en unos rendimientos bajos comparados con las variedades de ciclo más corto.

La temperatura es el factor que más influye sobre la planta de arroz durante la fase crítica de la división meiótica de las células madres del polen y durante la floración. La temperatura crítica para la inducción de la esterilidad se sitúa entre los 10 y 15°C, acentuándose este fenómeno con temperaturas moderadamente bajas pero prolongadas (Tinarelli, 1989). En riego por inundación se consigue una cierta regulación de la temperatura del aire con el agua embalsada (López Bellido, 1991), de forma que ésta actúa como amortiguador de temperaturas extremas. Sin embargo, en el riego por aspersión al no existir dicha capa de agua, esta regulación no ocurre. A ello puede deberse las diferencias en rendimiento y porcentaje de granos vacíos observados en este ensayo frente a los observados en Navarra por Bozal *et al.* (2002).

En cuanto a la relación entre el rendimiento en grano y los componentes del rendimiento es de resaltar la débil, aunque significativa, correlación negativa entre el rendimiento en grano y el número total de granos formados por panícula. Este resultado es contradictorio pues, lógicamente a mayor número de granos mayor potencial productivo y, por lo tanto, mayor rendimiento. Sin embargo, dado el alto porcentaje de granos vacíos que en algunas variedades supera al de granos llenos, no puede afirmarse categóricamente que exista dependencia entre ambas variables, ya que esa débil significación desaparece al eliminar del análisis algunas de las variedades de ciclo más largo. Así, los rendimientos más altos estuvieron relacionados con un menor porcentaje de granos vacíos. No obstante, esto se podría explicar por las relaciones compensatorias establecidas entre los diferentes componentes del rendimiento (Martínez Eixarch, 2010).

En ensayos realizados por Batalla (1999) en Extremadura, en los que se compararon 20 variedades en los dos sistemas de riego, el PMG medio en aspersión fue de 28,3 g en tanto que con inundación fue de 31,3 g. En nuestro ensayo el valor medio fue más bajo, 23,8 g. Sin embargo, si se tienen en cuenta sólo las variedades comunes a ambos ensayos sólo Thainato, que es de ciclo corto, tuvo un PMG similar, en tanto que las de ciclo largo, mejor adaptadas a las condiciones de Andalucía y Extremadura, tuvieron en nuestro ensayo valores de PMG entre 13 y 21% inferiores. Por otra parte, los resultados obtenidos en la campaña 2001 en Navarra por Bozal *et al.* (2002) parecen corroborar que el PMG, en el sistema de cultivo con riego por aspersión, es inferior al que se obtiene con inundación.

Se observó que las ocho variedades de menor PHL fueron, a su vez, las de ciclo más largo, con excepción de Puebla, que siendo de ciclo largo tuvo un PHL que la situó entre las ocho primeras. El PHL es un carácter que está muy influenciado por el medio (suelo, clima y manejo agronómico) y que indica las condiciones en que se ha desarrollado el cultivo. Aunque la experiencia es de sólo un año, el hecho de que todas las variedades de ciclo largo hayan obtenido menor PHL hace pensar en una mala adaptación a nuestras condiciones.

En cuanto al calibre del grano, todas las variedades presentan valores aceptables por el mercado, no así en lo que se refiere al rendimiento industrial que tuvo valores bajos. La variedad Guadiamar tuvo el mayor valor del rendimiento industrial (68%) y Puntal el menor (43%), siendo de subrayar el hecho de que la variedad Guadiamar es la preferida entre los arroceros de Aragón, por su buen rendimiento industrial.

La relación negativa hallada entre la longitud del grano y el rendimiento industrial parece indicar que a mayor longitud del grano mayor facilidad de éste de romperse y por tanto ser menos apto para el procesado industrial.

IV.5. CONCLUSIONES.

La nascencia y establecimiento del cultivo de arroz bajo riego por aspersión fueron en general muy lentos, lo que puede explicar que la densidad de plantas nacidas a los 19 días de la siembra diera valores inferiores a un 50% de germinación. Sin embargo, la variedad con peor nascencia (Ganao) fue la de mejor rendimiento, lo que implica que hubo una compensación de rendimiento por mayor ahijamiento, y posiblemente que el conteo se realizó antes de que la nascencia se hubiera completado.

Las diferencias de precocidad en el espigado entre las variedades fueron de hasta 30 días. Las variedades de grano largo fueron las de ciclo más largo y presentaron problemas para cubrir su ciclo vegetativo, dando como consecuencia peores rendimientos en grano. Existió una relación entre precocidad y rendimiento, observándose que las variedades de ciclo más corto (Ganao, Puebla, Loto, Thainato y Guadamar) resultaron ser las más productivas.

El índice de cosecha de todas las variedades fue bastante bajo, siendo la variedad Thainato la que presentó el máximo valor. Asimismo, las variedades Ganao, Puebla, Loto, Guadamar, Gladio y Guara también presentaron valores altos del índice de cosecha.

El porcentaje de granos vacíos fue en general alto. La variedad con menor porcentaje de granos vacíos fue Ganao y la de mayor fue Alena. El porcentaje de granos vacíos aumentó al aumentar los días a espigado, siendo ésta una de las razones del menor rendimiento de las variedades de ciclo más largo.

En cuanto a la calidad del grano, las variedades Thainato, Guadamar y Lido formaron el grupo con mayor valor del PHL del grano mientras que las variedades de ciclo largo tuvieron menor PHL. Asimismo, las variedades Guadamar, Thainato y Lido tuvieron los valores mayores del rendimiento industrial con valores superiores al 66%.

Las variedades de tipo Índica, de grano largo, se adaptan peor a las condiciones del Valle medio del Ebro y riego por aspersión. Las variedades de grano redondo y semilargo han dado los mejores rendimientos. En particular las variedades mejor adaptadas han sido: Ganao, Puebla, Loto, Thainato y Guadamar.

Es necesario continuar el estudio del comportamiento de distintas variedades de arroz en riego por aspersión en las condiciones agroclimáticas del Valle del Ebro, ya que estos resultados corresponden a un único año de ensayos.

CAPÍTULO V.

**RESPUESTA PRODUCTIVA DEL
ARROZ BAJO RIEGO POR
ASPERSIÓN A DIFERENTES
DOSIS DE AGUA.**

V.1. INTRODUCCIÓN.

El arroz se cultiva tradicionalmente con riego por inundación continua, de manera que se forma una lámina de agua sobre parcelas niveladas a pendiente cero donde crece el cultivo. Un pequeño caudal de agua entra en la parcela y mantiene el nivel de agua en la misma. Normalmente en las fincas arroceras se riegan varias parcelas contiguas de forma que una vez inundadas, ese pequeño caudal de agua entra en la parcela situada a la cota más alta y el desagüe de esa parcela pasa a la siguiente situada a cota inferior y así sucesivamente hasta regar todas las parcelas. El desagüe de la última parcela, situada a la cota más baja, se vierte normalmente a un azarbe. Estas pérdidas por escorrentía en el riego por inundación del arroz suelen ser bajas debido a que el desagüe que se produce en la última parcela es muy escaso.

La función del caudal de riego que se aplica a los campos de arroz en riego por inundación es proporcionar al cultivo el agua que necesita para su crecimiento, mantener el nivel de agua a lo largo del ciclo de cultivo y hacer funciones de calentamiento y refrigeración de la planta.

Con esta técnica de riego las pérdidas de agua de riego por percolación y evaporación directa pueden ser importantes debido a que se mantiene una lámina de agua libre en la parcela a lo largo de prácticamente todo el ciclo de cultivo del arroz. Las pérdidas de agua por evaporación directa se producen fundamentalmente en las primeras fases de desarrollo del cultivo cuando la cobertura de la lámina de agua por el cultivo es escasa. Una vez que el cultivo sombrea la totalidad de la superficie, las pérdidas de agua por evaporación se reducen sensiblemente. Las pérdidas por percolación dependen sobre todo de la permeabilidad del suelo. En suelos permeables las pérdidas por percolación son muy cuantiosas pero normalmente el cultivo de arroz con riego por inundación se produce en zonas de suelos con bajas tasas de infiltración y por tanto las pérdidas por percolación no son altas. Con objeto de reducir la percolación muchos agricultores utilizan la técnica del fangueo que consiste en crear una suela de labor relativamente impermeable mediante laboreo con aperos adecuados.

Debido a la escasez de agua a nivel mundial se está generando un interés creciente por sistemas de cultivo en el que no se inunden los campos y se emplee menos agua (Bouman, 2001; Bouman y Tuong, 2001). Una de estas alternativas es el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. El ahorro de agua que representa este sistema supone reducciones del 50% (Bouman *et al.*, 2002; Spanu y Murtas, 2002), factor de elevada importancia dada la escasez de agua en determinados años, que ha limitado hasta el momento la superficie susceptible de cultivo. Este sistema permite además sacar el cultivo de los campos habituales a otros suelos de mayor fertilidad, reduciéndose el monocultivo y permitiendo una rotación más variada, con las ventajas agronómicas y de costes que ello conlleva. El empleo de riego por aspersión en el cultivo de

arroz permite además su cultivo en tierras permeables que no serían adecuadas para la producción de arroz con riego inundado por las excesivas pérdidas de percolación de agua.

Aunque se iniciaron estudios al respecto al final de la década de los 70 e inicio de los 80 (Ferguson y Gilmour, 1977; Oosterhuis, 1978; Puckridge y O'Toole, 1981), la línea de investigación se ralentizó por la inferioridad en los rendimientos obtenidos frente al sistema de cultivo con riego por inundación, en cuanto que la prioridad era el incremento de la producción.

La bibliografía indica diferencias en los rendimientos obtenidos en arroz regado por aspersión frente al obtenido en inundación. Así, hay estudios que han encontrado una disminución importante del rendimiento cuando se utiliza riego por aspersión (Wescott y Vines, 1986; Muirhead *et al.*, 1989; McCauley, 1990; Bouman *et al.*, 2002;), mientras que otros han obtenido rendimientos similares al arroz inundado (Spanu y Pruneddu, 1996; Guiducci *et al.*, 1999; Spanu y Murtas, 2002). Hay que destacar que aunque los rendimientos del arroz en riego por aspersión pueden ser inferiores a los obtenidos con riego por inundación (Tabla V.1), los costes de producción son menores, ya que no se requiere el uso de maquinaria especial para hacer las labores en suelos enfangados, y se evitan costosas aplicaciones de herbicidas en el arroz inundado. Por esta razón el cultivo del arroz en aspersión tiene un mayor interés ya que se puede mantener la rentabilidad del cultivo aún con menores producciones que en riego inundado.

Tabla V.1. Producción media de grano de arroz en distintos lugares del mundo.

	Producción media (t ha ⁻¹)	
	Aspersión	Inundación
Aragón, España (ensayos propios)	4-7	5-8
Brasil (Crusciol <i>et al.</i> , 2003b)	4	6,5-7
China (Bouman <i>et al.</i> , 2002)	4,7-6,6	8-8,8
Italia (Guiducci <i>et al.</i> , 1999; Spanu y Pruneddu, 1996)	6-10	6-10

En la actualidad el arroz con riego por aspersión se produce en pequeña escala en diversas áreas de Italia y China, llegándose a cultivar hasta 300,000 ha en Brasil (Pinheiro *et al.*, 2006). En España se han iniciado estudios en Extremadura y Aragón (Batalla, 1999; Martínez-Cob y Pérez-Coveta, 2006; Castellví *et al.*, 2006; Caveró *et al.*, 2011).

El objetivo de este capítulo es conocer la respuesta productiva del arroz a un suministro variable de riego y establecer la dosis de riego más adecuada para el cultivo del arroz bajo aspersión en las condiciones climatológicas del Valle Medio del Ebro.

V.2. MATERIAL Y MÉTODOS.

V.2.1. Localización de los ensayos.

En las campañas de los años 2001, 2002 y 2004 se realizaron ensayos de campo en la finca experimental de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) en Montañana (Zaragoza). Las características físicas de las parcelas experimentales, sus coordenadas geográficas, el clima y el suelo han sido descritos anteriormente en el Capítulo III.

V.2.2. Prácticas culturales.

Se ha estudiado la respuesta de variedades de arroz de interés para los agricultores del Valle Medio del Ebro: Balilla x Sollana (denominada en este capítulo también como BxS), Gladio, Guadiamar y Loto (Tabla V.2). En la campaña de 2001 se sembró una variedad de grano redondo: Balilla x Sollana, una de grano largo: Gladio y otra de grano semilargo: Guadiamar. En el año 2002 se repitieron las mismas variedades, pero a final del ciclo se decidió descartar la variedad Balilla x Sollana por no haberse podido realizar un adecuado control de malas hierbas, que afectó de forma importante al rendimiento del cultivo. En la campaña de 2004 este ensayo se realizó con las variedades Guadiamar y Loto, esta última también de grano semilargo, en sustitución de las variedades Balilla x Sollana y Gladio (que no estaban disponibles) y que también resultan de interés en el Valle Medio del Ebro.

Tabla V.2. Variedades estudiadas en los tres años de ensayo.

Campaña	Variedades
2001	Balilla x Sollana, Gladio, Guadiamar
2002	Gladio, Guadiamar
2004	Guadiamar, Loto

La siembra, en los tres años de ensayo, se realizó con sembradora convencional de cereales, en líneas separadas a 13 cm y a una profundidad de siembra de 3-5 cm. La dosis de siembra en 2001 fue 150 kg ha⁻¹ y en las campañas de 2002 y 2004 fue 230 kg ha⁻¹. Se sembró una superficie de 30 m x 15 m en cada una de las variedades, a excepción del año 2004 en que la superficie fue de dos repeticiones de 30 m x 10 m para cada variedad (Figura V.1).

En la campaña 2001 la siembra se efectuó el 9 de mayo. Después de la siembra se instaló un equipo móvil de aspersión con tuberías de aluminio formado por tres ramales paralelos de aspersión de 72 m de longitud, separados a 15 m y con los aspersores a equidistancias de 18 m. Con esta disposición de los tres ramales de aspersores se consiguió un marco triangular de riego por aspersión de 18 m x 15 m. Para un correcto establecimiento del cultivo la parcela experimental se regó de forma uniforme durante 3 semanas todo el ensayo con el equipo descrito que cubría la totalidad de la superficie sembrada,

aplicándose 76 mm en este periodo de establecimiento del cultivo, dándose el primer riego el día 17 de mayo.

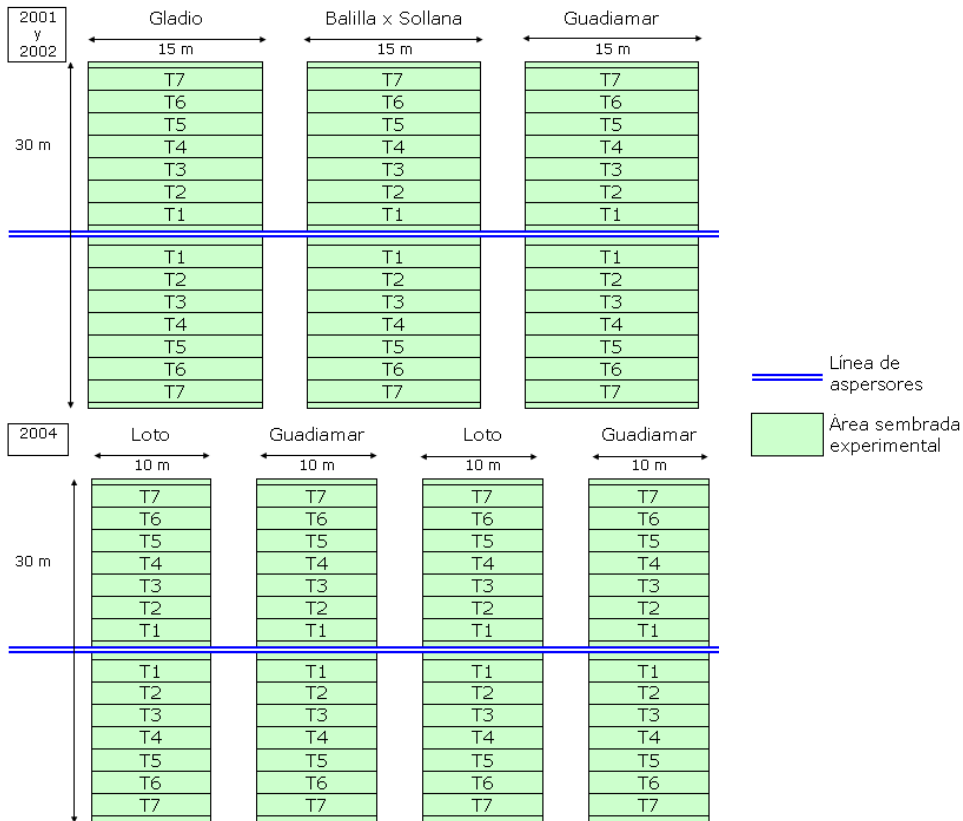


Figura V.1. Croquis del ensayo en las campañas 2001, 2002 y 2004.

En la campaña de 2002 la siembra se efectuó el 17 de mayo de 2002 y se sembraron las mismas variedades que el año anterior, dándose el primer riego el día 28 de mayo. Las condiciones de siembra se repitieron, instalándose para el riego en este año un equipo móvil de aspersión, con tuberías de polietileno y enlaces herméticos. Este nuevo material de riego se empleó para evitar los problemas del vaciado de las tuberías clásicas móviles de aluminio empleadas en el riego por aspersión a través de sus juntas de unión cuando se pone en marcha y se apaga el sistema de riego. Las juntas de estos tubos de polietileno utilizados en el año 2002 eran estancas y no se producían fugas en la puesta en marcha y parada del sistema de riego. Durante el primer mes se efectuó un riego uniforme de todo el ensayo con los tres ramales de aspersión dispuestos en una colocación similar a la utilizada en el año 2001 (marco triangular de 18 m x 15 m) aplicándose 205 mm de riego. El 25 de junio se retiraron los ramales exteriores de riego y se instaló la fuente lineal de aspersión con aspersores a 6 m de separación como el año anterior.

En la campaña 2004 la siembra se realizó el 27 de abril, pero se hicieron dos repeticiones de 30 m x 10 m por variedad (Guadamar y Loto). El procedimiento de establecimiento del cultivo en la fase inicial fue similar al utilizado en las campañas de 2001 y 2002. El equipo de riego por aspersión utilizado fue el mismo que en el año 2002 con tuberías de polietileno y enlaces herméticos. La dosis de riego aplicada para el establecimiento del cultivo fue de 221 mm, iniciándose los riegos diferenciales el 21 de junio.

En las tres campañas el ensayo se fertilizó en presiembra con abono 8-15-15 a una dosis de 670 kg ha⁻¹ y posteriormente se aplicaron dos coberteras (en pleno ahijado y en iniciación de la panícula) en cada una de las cuales se aplicaron 50 kg N ha⁻¹ en forma de nitrato amónico al 33,5%.

La cosecha se realizó una vez alcanzada la madurez fisiológica del cultivo. Las fechas de aplicación del abono, así como de siembra y cosecha del arroz, se muestran en la Tabla V.3.

Tabla V.3. Fechas en que se realizaron la siembra, cosecha y fertilización en los tres años de ensayo.

Campaña	Siembra	Cosecha	Fertilización		
			Fondo	Cobertera 1	Cobertera 2
2001	09/may/01	17-25/oct/01	08/may/01	11/jun/01	10/jul/01
2002	17/may/02	04/nov/02	16/may/02	12/jun/02	01/jul/02
2004	27/abr/04	08/oct/04	21/abr/04	21/jun/04	16/jul/04

El control de malas hierbas se realizó mediante escarda manual y química. Además de la escarda manual efectuada en sucesivas ocasiones a lo largo del ciclo del cultivo, en la campaña 2001 se efectuó un primer tratamiento el 4 de junio con propanil 35% (Herbimur, Sarabia) a 3,5 L ha⁻¹ en postemergencia precoz (arroz con 3-4 hojas) y un segundo tratamiento con bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf) a dosis de 2 L ha⁻¹ el 2 de julio. En la campaña 2002 dicho tratamiento con propanil 35% (Herbimur, Sarabia) a 3,5 L ha⁻¹, se realizó en dos ocasiones: la primera, en postemergencia precoz, el 24 de junio, y la segunda, tres semanas después, el 15 de julio. El tratamiento de preemergencia en 2004 se hizo el 27 de abril con clomazona 36% (Command CS, FMC Foret) a dosis de 0,36 kg ha⁻¹. El siguiente tratamiento en postemergencia precoz del arroz, con bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf) a dosis 2 L ha⁻¹, se realizó el 15 de junio y el tratamiento en postemergencia tardía con azimsulfurón 50% (Gulliver, DuPont) (20 g ha⁻¹) el 1 de julio.

V.2.3. Diseño experimental. Tratamientos de riego.

Unas tres semanas después del inicio de los riegos, tras haber logrado la nascencia y establecimiento del cultivo, se retiraron los ramales exteriores de riego y se añadieron aspersores al ramal central para formar la fuente lineal

de aspersión definitiva, de forma que los aspersores quedaron instalados a equidistancias de 6 m. A partir de esa fecha se iniciaron los riegos diferenciales con la fuente lineal de aspersión situada en el centro de la parcela.

El riego diferencial en todas las campañas de riego se efectuó con una fuente lineal de aspersión (Hanks *et al.*, 1976). La fuente lineal consiste en un ramal equipado con aspersores instalados a equidistancias cortas de forma que con el solapamiento de los aspersores se consigue una distribución de agua simétrica a ambos lados de la fuente lineal de forma triangular con el máximo junto a la fuente lineal y el mínimo a una distancia igual al alcance de los aspersores. Mediante esta técnica se consigue aplicar fácilmente un gradiente variable de riego en dirección perpendicular a la fuente lineal de aspersión y los ensayos de riego se pueden efectuar en una superficie relativamente pequeña. Esta técnica de riego se ha utilizado extensamente por numerosos autores en muchos cultivos con objeto de determinar su función de producción respecto al agua (Faci, 1986; Coscolluela y Faci, 1992; Berenguer, 1996; Farré, 1998).

En los tres años de estudio la fuente lineal de aspersión estuvo equipada con aspersores RC130 de Riegos Costa (Lleida, España), con dos boquillas de 4,4 mm y 2,4 mm de diámetro, separados a equidistancias de 6 m. Los aspersores se instalaron a 1,5 m de altura sobre el suelo. La fuente lineal quedó orientada en 2001 en dirección Norte-Sur, mientras que en las campañas 2002 y 2004 la orientación fue Este-Oeste.

En los ensayos se consideraron como tratamientos de riego 7 parcelas experimentales situadas a distintas distancias de la fuente lineal de aspersión a cada lado de la fuente lineal. La dosis mayor de riego se aplicó al tratamiento T1 situado a 1,5 m de la línea de aspersores (Figuras V.1 y V.2). El tratamiento menos regado (T7) apenas recibió riego ya que estaba situado a 13,5 m de la fuente lineal de aspersión, prácticamente fuera ya del alcance de los aspersores. Los tratamientos T2 a T6 recibieron cantidades de agua de riego menores conforme su localización se alejaba de la línea de aspersores. Los riegos se efectuaron de forma que el tratamiento más regado (T1) recibiese una cantidad de agua de riego y precipitación de 1,2 veces la ET_0 , aplicándose 3 riegos semanales y evitándose regar con vientos superiores a 2 m s^{-1} . Así, en las campañas 2001 y 2002 se establecieron 14 bandas por variedad (7x2) y en la campaña 2004 se establecieron 28 (7x4).

El agua aplicada en cada tratamiento se midió al finalizar cada riego, con 4 líneas de pluviómetros instalados en el centro de cada tratamiento, separados uno de otro 2 m. Los pluviómetros utilizados eran de forma troncocónica, contruidos en material plástico transparente, con una abertura circular de 8,0 cm de diámetro y estaban graduados en divisiones de 1 L m^{-2} . Los pluviómetros se instalaron a una altura de 1 m sobre el suelo, permaneciendo siempre por encima del cultivo.

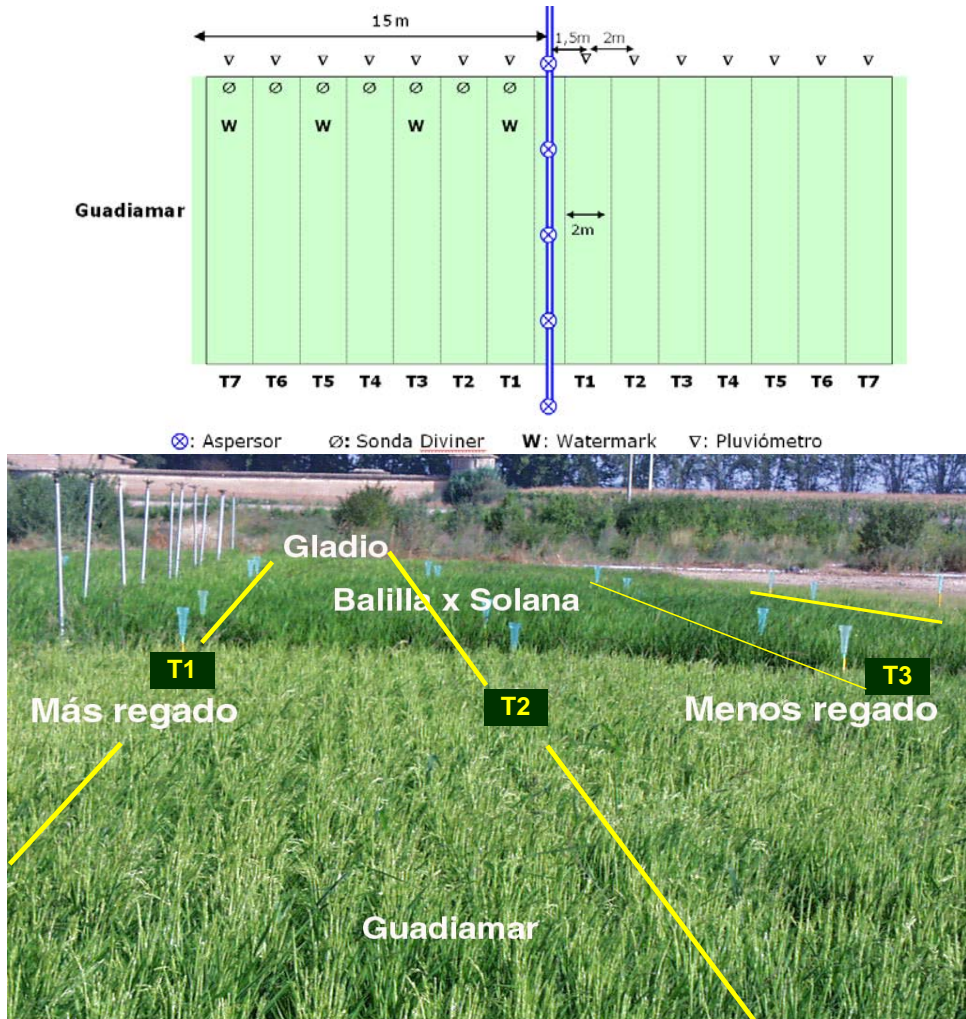


Figura V.2. Croquis detallado de una repetición del ensayo de fuente lineal de aspersión en una variedad. Fotografía de la fuente lineal de aspersión en 2001.

V.2.4. Medidas experimentales

Estado hídrico del suelo en los ensayos.

Durante los tres años de ensayo se tomaron muestras gravimétricas de suelo con barrena, en capas de 30 cm hasta 90 cm de profundidad, al inicio (a excepción del primer año) y al final del ciclo del cultivo. Las muestras de suelo se recogieron en recipientes metálicos herméticos y se llevaron al laboratorio donde se pesaron, se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante y posteriormente se volvieron a pesar en balanza de precisión para la determinación de su humedad gravimétrica.

En 2001 se instalaron sensores de matriz granular Watermark para medir el potencial mátrico del suelo a una profundidad de 30 y 60 cm en los 7 tratamientos de riego realizándose medidas manuales con frecuencia quincenal desde el ahijamiento hasta la cosecha. En los años 2002 y 2004 las medidas se automatizaron mediante la conexión de los sensores a una estación Micro-Isis (Prógres, Lleida, España) que recogía los datos con una frecuencia de 30 minutos. En el año 2002 los sensores se instalaron en los tratamientos T1, T3, T5 y T7, a 30 y 60 cm de profundidad. En 2004 se colocaron en los mismos tratamientos pero a una profundidad de 15 y 30 cm, al haberse observado que las raíces del arroz no sobrepasaron los 30 cm de profundidad.

En las campañas de 2002 y 2004 también se tomaron semanalmente medidas de humedad del suelo cada 10 cm hasta una profundidad de 90 cm, con una sonda FDR Diviner 2000 (Sentek, Pty Ltd. South Australia) en tubos de acceso para la sonda Diviner 2000 instalados en los distintos tratamientos (Figura V.3).

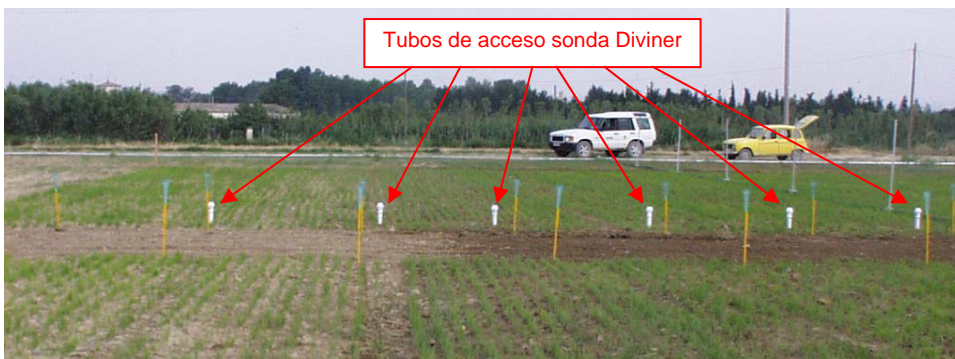


Figura V.3. Tubos de acceso para la medida de la humedad del suelo con la sonda FDR Diviner 2000 en el año 2002, en la variedad Guadiamar. De izquierda a derecha, los tubos corresponden a los tratamientos de riego T6S, T5S, T4S, T3S, T2S y T1S.

Medidas experimentales en el cultivo.

A lo largo del ciclo del arroz se han realizado las siguientes observaciones, medidas y muestreos:

Densidad de plantas por m². En todas las campañas se procedió a contar el número de plantas de arroz, en dos marcos de 0,5 m², a las 6 semanas tras la siembra.

Altura de planta. Se midió la altura de varias plantas elegidas al azar. En la campaña de 2001 la altura se midió como la distancia desde el suelo hasta el extremo superior de la planta. En las campañas de 2002 y 2004 la altura de la planta después de la aparición de la panícula se midió como la altura desde el suelo hasta la base de la panícula.

Radiación interceptada por el cultivo. Se midió con el ceptómetro Sunscan Canopy Analysis System de Delta-T Devices LTD (Cambridge, Inglaterra). Las mediciones se realizaron en dos momentos a lo largo del cultivo: el 26 de julio y el 23 de agosto en 2001, el 1 de agosto y el 19 de septiembre de 2002 y, por último, el 19 de agosto de 2004. Para cada tratamiento y repetición se tomaron dos medidas encima del cultivo, seis debajo (perpendicular a las líneas de plantas) y otras dos encima. Con la media de las medidas encima y debajo del cultivo se calculó la radiación interceptada por el cultivo.

Componentes del rendimiento. Una vez alcanzada la madurez fisiológica, la recolección del arroz se hizo manualmente cosechándose la biomasa aérea de 1 m² en cada una de las parcelas elementales. Se segó a ras de suelo para recoger toda la biomasa aérea, procediéndose a separar (y contar) las panículas del resto de la planta, tras lo cual se secó en estufa a 60°C. Una vez seco se pesó la *biomasa* y se separó el grano de las panículas, pesando y midiendo la humedad del grano, para expresar el rendimiento en grano referido al 14% de humedad. Se obtuvo el valor del *peso de mil granos* (PMG).

Índice de cosecha: Se determinó en el muestreo realizado para la biomasa anteriormente descrito.

Número de panículas por m². Se contaron en el muestreo realizado para la biomasa anteriormente descrito.

Rendimiento en grano: Las parcelas elementales se cosecharon al día siguiente de la cosecha manual utilizando una cosechadora de ensayos Hege 125 B (Hans-Ulrich Hege, Waldenburg, Alemania), con una anchura de corte de 1,25 m (Figura V.4). El rendimiento de la parcela se determinó como la suma de los obtenidos en la recolección manual y la mecánica.

Productividad del agua. Se calculó la productividad del agua como los kg de grano (14% de humedad) producidos por m³ de agua aplicada (riego + precipitación).

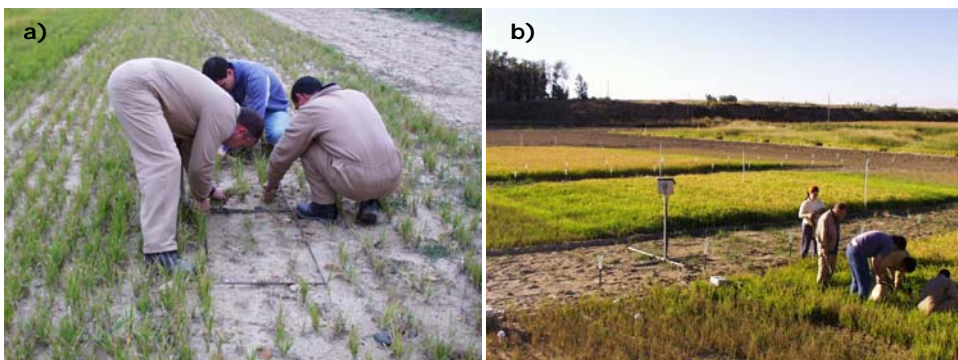


Figura V.4. Recolección manual de la biomasa aérea. a) Recolección del tratamiento menos regado (T7). b) Recolección de un tratamiento intermedio (T4).

V.2.5. Análisis estadístico de los resultados de los ensayos.

El diseño de la fuente lineal no permite la aleatorización de los tratamientos (Hanks *et al.*, 1980) y dado que la complejidad de un diseño más adecuado a lo indicado por Johnson *et al.* (1983) no ha sido posible, se ha procedido a analizar los resultados obtenidos mediante análisis de regresión. Se ha profundizado en el análisis de los resultados mediante el estudio de las relaciones existentes entre distintos parámetros indicadores del estado hídrico del suelo, del desarrollo del cultivo y de los rendimientos y sus componentes con las cantidades de agua aplicada (riego y precipitación) en las distintas localizaciones de la fuente lineal de aspersión seleccionadas como tratamientos de riego. Los datos puntuales de los análisis de regresión efectuados corresponden a la media de las repeticiones a ambos lados de la fuente lineal de los valores del agua aplicada y de la variable considerada en cada caso. Al hacer los análisis de regresión de las distintas variables (rendimiento, PMG, densidad de panículas,...), respecto a la cantidad de agua aplicada, cuando estas variables tenían valores nulos para las menores cantidades de agua se han descartado estos puntos, excepto el correspondiente a la mayor cantidad de agua. El programa empleado ha sido STATGRAPHICS Plus 5.0.

V.3. RESULTADOS.

V.3.1. Agua aplicada a los distintos tratamientos.

La distribución de las cantidades de agua de riego aplicada por la fuente lineal de aspersión ha seguido un patrón muy uniforme durante las tres campañas estudiadas, tal como puede observarse en las Figuras V.5 y V.6. Hay que destacar que la distribución del riego estacional aplicado en las tres campañas presenta una alta simetría respecto a la fuente lineal de aspersión lo cual indica que la aplicación de agua fue similar a ambos lados de la fuente lineal. Los valores máximos de agua aplicada en riego se produjeron junto a la fuente lineal de aspersión (tratamiento T1) y los valores mínimos en el tratamiento más alejado de la fuente lineal de aspersión (tratamiento T7).

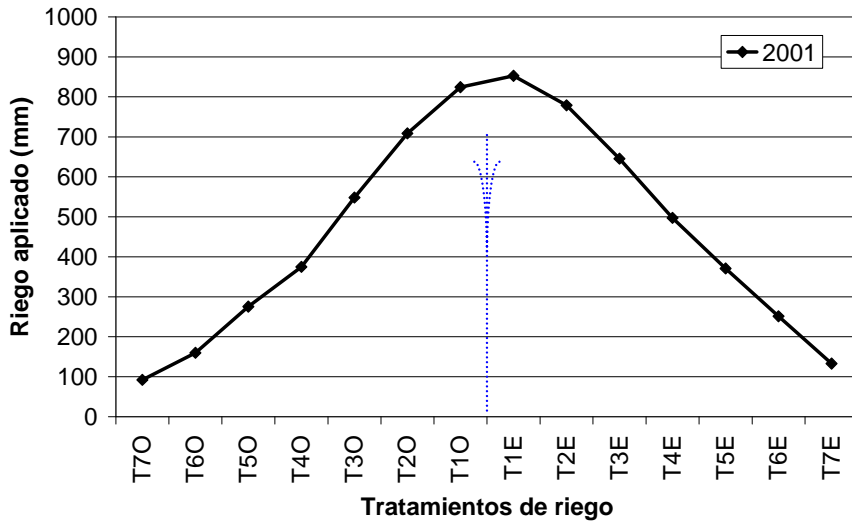


Figura V.5. Dosis estacionales de riego aplicadas en los distintos tratamientos (T1 a T7) en 2001. Las letras O y E detrás de la denominación de los tratamientos indican los lados Oeste y Este respectivamente de la fuente lineal de aspersión. La línea discontinua de puntos en color azul indica la posición de la fuente lineal respecto a los tratamientos.

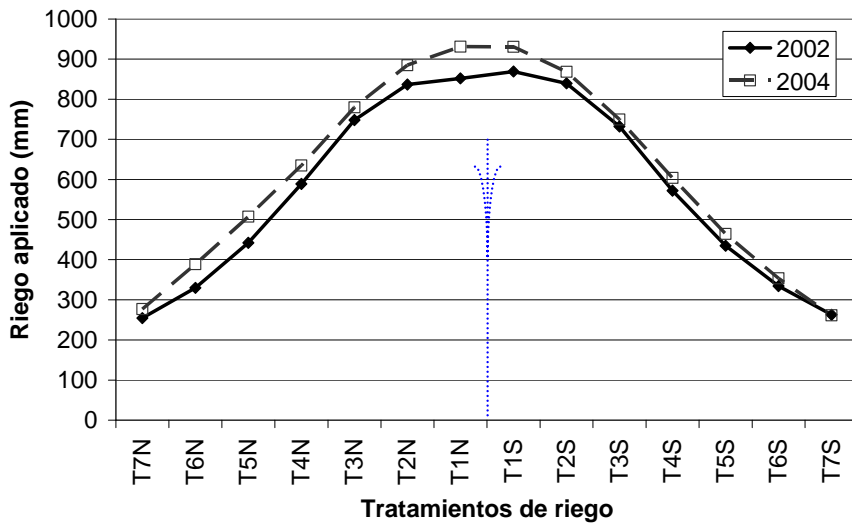


Figura V.6. Dosis estacionales de riego (mm) aplicadas en los distintos tratamientos (T1 a T7) en las campañas 2002 y 2004. Las letras N y S detrás de la denominación de los tratamientos indican los lados Norte y Sur respectivamente de la fuente lineal de aspersión. La línea discontinua de puntos en color azul indica la posición de la fuente lineal respecto a los tratamientos.

La Tabla V.4 presenta los valores estacionales medios aplicados en los distintos tratamientos y campañas de riego. Las cantidades estacionales de riego aplicadas en el tratamiento más regado (tratamiento T1) fueron de 838 mm en 2001, 861 mm en 2002 y 931 mm en 2004. Las cantidades estacionales de

riego aplicadas en el tratamiento menos regado fueron de 112 mm (2001), 259 mm (2002) y 269 mm (2004). Estas alturas estacionales del tratamiento T1 corresponden casi en su totalidad a los riegos iniciales de establecimiento del cultivo que fueron de 76 mm en 2001, 205 mm en 2002 y 221 mm en 2004. Los tratamientos intermedios recibieron cantidades de agua de riego comprendidas entre estos límites de los tratamientos extremos.

Tabla V.4. Valores estacionales medios del riego aplicado en los distintos tratamientos en las campañas 2001, 2002 y 2004. En los valores estacionales están incluidos los riegos iniciales de establecimiento del cultivo.

Tratamiento	Riego aplicado (mm)		
	2001	2002	2004
T1	839	861	931
T2	744	838	877
T3	597	740	765
T4	436	581	619
T5	323	438	486
T6	206	332	371
T7	113	259	269

En 2001, el inicio de los riegos para el correcto establecimiento del cultivo se comenzó el 17 de mayo, con una frecuencia de riegos de 1-2 días, hasta el 5 de junio, fecha en que se iniciaron los riegos diferenciales, aplicándose entonces 45 riegos hasta el 20 de septiembre. En 2002 se dieron en total 52 riegos, dándose el primero el 29 de mayo y el último el 20 de septiembre. En 2004 se dieron 83 riegos, iniciándose éstos el 7 de mayo y finalizándose el 27 de septiembre. Los valores de la precipitación durante el ciclo del cultivo del arroz en las campañas de 2001, 2002 y 2004 fueron de 126 mm, 209 mm y 100 mm, respectivamente.

La fuente lineal produjo un claro gradiente del agua aplicada (riego + precipitación) en los distintos tratamientos diferenciales de riego, que se mantuvo a lo largo de la estación de riegos del arroz en las tres campañas estudiadas (Figuras V.7, V.8 y V.9). Los gradientes de agua aplicada son lineales. Los coeficientes de determinación de las regresiones lineales del agua aplicada (R+Pr) frente a los tratamientos oscilaron entre 0,97 y 0,99, siendo significativas ($p < 0,0001$) en los distintos experimentos. En el año 2001 el riego más la precipitación no llegó a sobrepasar la curva de $1,2 \cdot ET_0$. Sin embargo en 2002 y 2004 el tratamiento T1 superó ligeramente la curva de $1,2 \cdot ET_0$.

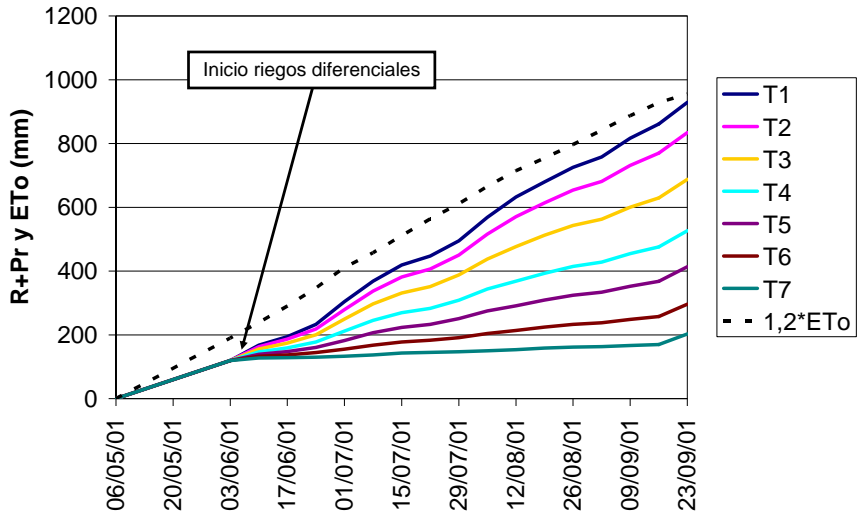


Figura V.7. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2001.

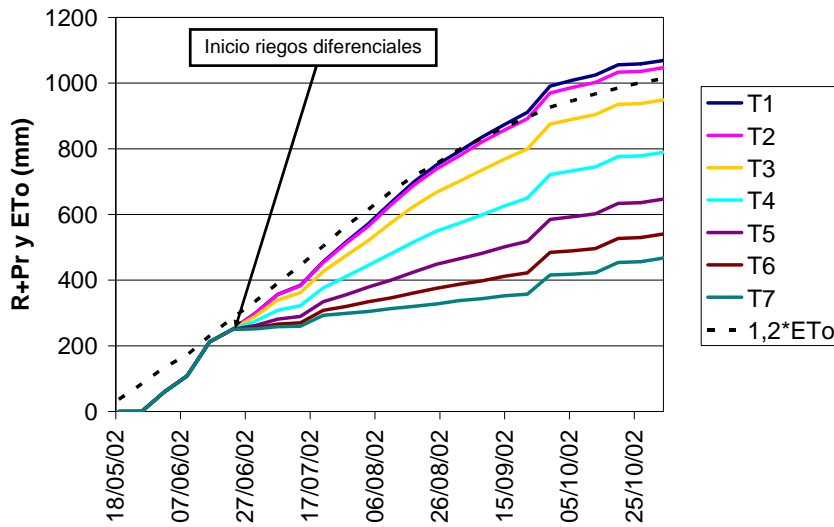


Figura V.8. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2002.

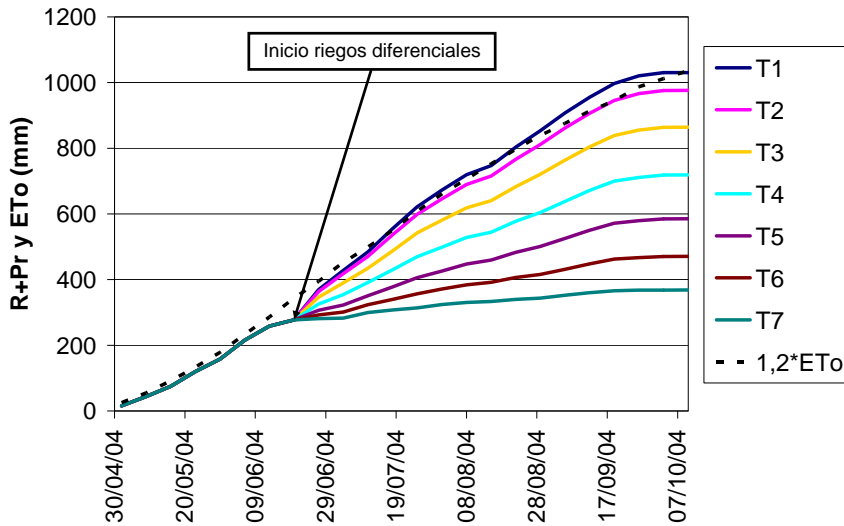


Figura V.9. Valores acumulados de riego y precipitación (R+Pr) en cada tratamiento y $1,2*ET_0$ en la campaña 2004.

V.3.2. Potencial mátrico del suelo.

El régimen de riego impuesto en los distintos tratamientos con la fuente lineal de aspersión produjo un importante efecto en el estado hídrico del suelo a lo largo del ciclo del cultivo. Los tratamientos más regados mantuvieron unos niveles de potencial mátrico del suelo mayores que en los tratamientos menos regados (Figura V.10 y Tablas V.5, V.6 y V.7).

En la Figura V.10 se pueden observar las medidas realizadas con sondas Watermark a 30 y 60 cm de profundidad en cuatro fechas en los meses de agosto y septiembre de 2001 en los distintos tratamientos de riego. Se observa que en las cuatro fechas y en las dos profundidades de medida, el potencial mátrico del suelo es muy próximo a cero en el tratamiento más regado (T1) y disminuye progresivamente hasta los tratamientos T3 y T4. El comportamiento del potencial hídrico del suelo en los tratamientos con mayor déficit hídrico (T5, T6 y T7) es más errático debido probablemente a que la extracción de agua por el cultivo en estos tratamientos fue muy escasa ya que en algunos casos la biomasa aérea del cultivo era prácticamente nula. Así, dado que el sistema radicular del arroz concentra la mayor parte de las raíces en los primeros 30 cm de profundidad (Figura V.11), la extracción de agua por el cultivo en los tratamientos extremos fue poco importante en la profundidad de 60 cm y esto hizo que el potencial mátrico del suelo permaneciera relativamente alto.

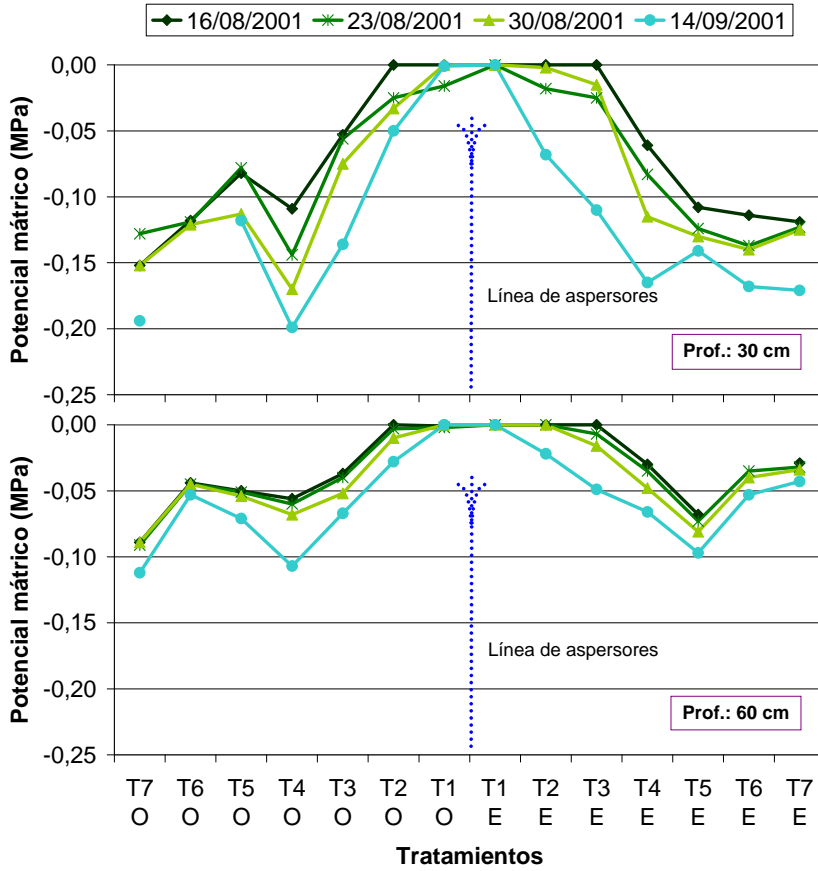


Figura V.10. Potencial mátrico del suelo para los distintos tratamientos de riego, a 30 y 60 cm de profundidad a ambos lados de la fuente lineal de aspersión (oeste y este), en cuatro fechas en agosto y septiembre de 2001.



Figura V.11. Sistema radicular del arroz regado por aspersión.

La Tabla V.5 presenta el valor mensual medio del potencial mátrico del suelo, en la campaña 2002, a 30 y 60 cm de profundidad, en los tratamientos T1, T3, T5 y T7 en la variedad Guadamar durante la campaña de 2002. En el tratamiento T1 el potencial hídrico del suelo a 30 y 60 cm de profundidad no bajó por debajo de -0,02 MPa, lo cual indica que el riego aplicado durante todo el ciclo del cultivo mantuvo la humedad del suelo próxima a capacidad de campo y presumiblemente el cultivo tuvo un buen suministro hídrico. En el tratamiento T3 en los meses de julio a septiembre el riego mantuvo el potencial mátrico del suelo a 30 cm de profundidad en valores de -0,03 MPa, y a 60 cm de profundidad mantuvo una mayor humedad. En los tratamientos T5 y T7 el potencial mátrico fue menor.

Tabla V.5. Valores mensuales medios del potencial mátrico del suelo a 30 y 60 cm de profundidad en la variedad Guadamar en 2002.

Mes	Potencial mátrico del suelo (MPa)							
	30 cm				60 cm			
	T1	T3	T5	T7	T1	T3	T5	T7
Julio	-0,016	-0,031	-0,066	*	-0,014	-0,013	-0,056	-0,033
Agosto	-0,019	-0,030	*	*	-0,009	-0,013	-0,069	-0,099
Septiembre	-0,016	-0,030	-0,120	*	-0,019	-0,013	*	-0,120

* Valor no válido por estar fuera de rango.

En la campaña de 2004 los riegos diferenciales produjeron un efecto similar al de las campañas anteriores en el régimen hídrico del suelo en los distintos tratamientos de riego. Las Tablas V.6 y V.7 presentan la evolución del potencial mátrico del suelo a 15 y 30 cm de profundidad en los tratamientos T1, T3, T5 y T7 de las variedades Guadamar y Loto, respectivamente. En ambas variedades el potencial mátrico del suelo del tratamiento T1 a 15 y 30 cm se mantiene en niveles altos, superiores normalmente a -0,02 MPa salvo en algunos momentos puntuales hasta primeros de octubre. Al final del periodo de cultivo se observa un aumento de la tensión de humedad que llega hasta valores de -0,08 MPa a 15 cm de profundidad debido a que en esas fechas ya se había alcanzado la madurez fisiológica y se interrumpieron los riegos. En ambas variedades el potencial mátrico del suelo a 15 y 30 cm de profundidad del tratamiento T3 fue menor que en el T1. En los tratamientos T5 y T7 el potencial mátrico del suelo a 15 y 30 cm de profundidad fue menor que en los tratamientos T3 y T1 y descendió por debajo de -0,12 MPa durante distintos periodos. En el caso de la variedad Guadamar hay que destacar que se observaron mayores oscilaciones del potencial mátrico del suelo sobre todo en el tratamiento T5 que pudieron ser debidos a la propia instalación de las sondas Watermark. Al instalar las sondas pudo quedar un camino preferencial de entrada vertical de algo de agua de los riegos que llegó hasta las mismas sondas afectando a las lecturas.

Tabla V.6. Valores mensuales medios del potencial mátrico a 15 y 30 cm de profundidad en la variedad Guadiamar en 2004.

Mes	Potencial mátrico del suelo (MPa)							
	15 cm				30 cm			
	T1	T3	T5	T7	T1	T3	T5	T7
Junio	-0,001	-0,018	-0,020	-0,044	-0,003	-0,011	-0,016	-0,018
Julio	-0,009	-0,022	-0,062	-0,077	-0,016	-0,018	-0,034	-0,048
Agosto	-0,014	-0,037	-0,075	*	-0,015	-0,035	-0,054	-0,087
Sept	-0,019	-0,034	-0,100	*	-0,016	-0,038	-0,068	-0,074

* Valor no válido por estar fuera de rango.

Tabla V.7. Valores mensuales medios del potencial mátrico a 15 y 30 cm de profundidad en la variedad Loto en 2004.

Mes	Potencial mátrico del suelo (MPa)							
	15 cm				30 cm			
	T1	T3	T5	T7	T1	T3	T5	T7
Junio	-0,012	-0,021	-0,020	-0,049	-0,015	-0,019	-0,012	-0,029
Julio	-0,007	-0,042	-0,079	-0,095	-0,015	-0,020	-0,048	-0,090
Agosto	-0,014	-0,068	*	*	-0,016	-0,078	-0,102	-0,113
Sept	-0,014	-0,032	*	*	-0,014	-0,024	-0,045	*

* Valor no válido por estar fuera de rango.

V.3.3. Evolución de la altura de agua almacenada en el suelo.

En las campañas de 2002 y 2004 se instalaron tubos de acceso para la medida de la humedad del suelo con la sonda Diviner 2000, que se utilizaron para conocer la evolución del agua almacenada en el suelo en los distintos tratamientos de riego (Tablas V.8 y V.9). En general, los resultados muestran el efecto del riego diferencial de la fuente lineal de aspersión en los distintos tratamientos de riego, pero en el año 2002 los resultados son algo erráticos ya que en la parcela de Gladio el contenido en agua del suelo en T3 es mayor que en T2 y en Guadiamar ocurre lo contrario. En las dos variedades, los valores de agua almacenada en el suelo han ido aumentando a lo largo de la campaña hasta el fin de los riegos, a excepción de los tratamientos menos regados. En la parcela de la variedad Guadiamar en 2002, la altura de agua en el periodo de julio a septiembre se mantuvo en valores mínimos comprendidos entre 65 y 110 mm en los tratamientos menos regados, mientras que en los tratamientos más regados (T2 y T3) se mantuvo en valores comprendidos entre 120 y 165 mm (Tabla V.8). En la variedad Gladio han estado comprendidas entre 133 y 174 mm, que corresponden a unos contenidos de humedad medios de 20% y 30%, respectivamente.

Tabla V.8. Valores medios mensuales de la altura de agua retenida en el perfil del suelo de 0 a 60 cm en las parcelas de las variedades Gladio y Guadiamar en la campaña de 2002.

Tratamiento	Altura de agua (mm)					
	Gladio			Guadiamar		
	Julio	Agosto	Septiembre	Julio	Agosto	Septiembre
T1	160	166	174	120	129	134
T2	143	133	139	156	160	165
T3	173	168	173	138	150	158
T4	149	138	135	156	158	155
T5				108	89	96
T6				97	66	79

Para los tratamientos T5 y T6 de Gladio no se dispone de medida.

En la campaña del 2004 los resultados muestran con más claridad el gradiente de las alturas de agua retenidas en el suelo a lo largo de la campaña del 2004 en las parcelas de las variedades Guadiamar y Loto. Los tratamientos más regados han mantenido unas alturas de agua en el suelo en los tratamientos más regados (T1 y T2) de 210 a 260 mm mientras que en los tratamientos menos regados estos valores variaron entre 130 y 165 mm (T6 y T7), con valores superiores en la parcela de la variedad Guadiamar (Tabla V.9).

Tabla V.9. Valores medios mensuales de la altura de agua retenida en el perfil del suelo de 0 a 60 cm en las parcelas de las variedades Guadiamar y Loto en la campaña de 2004.

Tratamiento	Altura de agua (mm)					
	Guadiamar			Loto		
	Julio	Agosto	Septiembre	Julio	Agosto	Septiembre
T1	261	258	256	248	240	237
T2	253	244	237	241	220	211
T3	239	214	207	188	143	148
T4	229	185	173	195	145	143
T5	198	169	158	163	146	151
T6	165	142	138	167	144	141
T7	157	140	135	159	140	133

En la Tabla V.10 se presentan los valores medios de la humedad gravimétrica al inicio del ensayo de la fuente lineal en los años 2002 y 2004. En ambos años el perfil de humedad del suelo al inicio de los ensayos fue similar con valores de humedad del suelo entre 18% y 19% en el perfil de del suelo de 30 a 90 cm de profundidad y valores algo más bajos en el perfil de 0 a 30 cm de profundidad.

Tabla V.10. Humedad gravimétrica del suelo al inicio de los ensayos de la fuente lineal de aspersión en las campañas de 2002 y 2004.

Perfil del suelo	Humedad gravimétrica media (%)	
	2002	2004
0-30 cm	16,5	17,6
30-60 cm	19,0	19,1
60-90 cm	18,0	18,3

Las Tablas V.11 a V.13 presentan los valores de la humedad gravimétrica después del cosechado del arroz en los distintos tratamientos en las campañas de 2001, 2002 y 2004. En el año 2001 sólo se tomaron muestras de suelo al final de la campaña en los tratamientos T1 a T4. En general se observa un descenso de la humedad del suelo en todos los perfiles y en las tres variedades conforme se pasa del tratamiento T1 al T4 (Tabla V.11).

Tabla V.11. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en noviembre de 2001.

Tratamiento	Humedad gravimétrica media (%)								
	BxS			Gladío			Guadamar		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
T1	11,9	13,8	14,2	11,3	15,2	16,0	13,0	15,1	14,5
T2	10,9	14,4	13,5	11,0	14,6	15,4	13,1	15,0	14,4
T3	10,4	13,7	14,7	10,3	13,8	14,9	11,1	13,7	14,7
T4	10,5	11,3	12,4	8,6	11,5	13,7	10,4	11,0	11,2

En el año 2002 se observó un gradiente de la humedad final del suelo acorde con el gradiente de agua aplicada en la fuente lineal sobre todo en los perfiles de 0-30 cm y 30-60 cm en la variedad Gladío y en el perfil de 0-30 cm en la variedad Guadamar (Tabla V.12). En el resto de perfiles de suelo el efecto del riego diferencial fue mucho menor. Presumiblemente la menor ET en los tratamientos de menor dosis de riego debido al poco crecimiento del cultivo mantuvo la humedad en el perfil del suelo en perfiles más profundos hasta la fecha de cosecha. En el año 2004 también se observó en las dos variedades estudiadas (Guadamar y Loto) un claro gradiente de humedad del suelo acorde con el gradiente de agua aplicada en riego en los distintos tratamientos mediante la fuente lineal de aspersión (Tabla V.13).

Tabla V.12. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en noviembre de 2002.

Tratamiento	Humedad gravimétrica media (%)							
	Gladio				Guadamar			
	0-30	30-60	60-90	90-120	0-30	30-60	60-90	90-120
T1	17,2	19,9	18,8	16,1	17,3	18,8	18,1	19,0
T2	17,1	19,6	19,3	18,8	17,5	19,6	18,9	19,8
T3	15,9	20,0	19,0	18,4	17,4	19,0	18,7	19,1
T4	16,0	18,6	19,3	-	16,5	18,6	15,7	19,4
T5	14,4	17,8	19,3	18,2	14,9	17,9	18,5	19,5
T6	14,0	17,2	18,6	18,5	15,1	18,3	18,2	19,4
T7	14,0	17,5	18,4	17,9	14,1	18,2	18,0	18,6

Tabla V.13. Humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo del arroz en los distintos tratamientos de riego de la fuente lineal de aspersión en octubre de 2004.

Tratamiento	Humedad gravimétrica media (%)							
	Guadamar				Loto			
	0-15	15-30	30-60	60-90	0-15	15-30	30-60	60-90
T1	15,9	17,1	18,9	19,3	20,2	22,2	21,9	19,7
T2	17,3	16,9	17,7	19,2	19,6	22,0	20,6	19,8
T3	14,1	15,3	17,3	17,9	18,2	18,8	19,3	19,8
T4	11,6	12,7	15,5	17,1	14,0	15,3	16,7	18,3
T5	10,5	13,6	15,3	16,9	9,7	13,7	16,1	17,3
T6	9,2	14,1	15,8	16,7	8,0	13,4	15,8	17,1
T7	8,9	12,6	14,6	15,9	7,2	13,1	15,4	16,8

V.3.4. Desarrollo del cultivo.

La densidad de plantas nacidas en las distintas parcelas estuvo en todas las variedades ensayadas por encima de las 220 plantas m⁻² (Tabla V.14). En el año 2001 la densidad de plantas nacidas en la variedad Gladio fue menor que en las otras variedades. Se observaron diferencias en la densidad de plantas entre años. En el año 2004 se obtuvieron las densidades más bajas.

Tabla V.14. Densidad de plantas nacidas, medida 6 semanas después de la siembra en las distintas variedades y años de ensayo con la fuente lineal de aspersión.

Variedad	Densidad de plantas (nº m ⁻²)		
	2001	2002	2004
BxS	352	-	-
Gladio	230	341	-
Guadamar	318	303	223
Loto	-	-	221

Aunque la altura del cultivo es una característica varietal, ha ido aumentando significativamente ($p < 0,01$) al aumentar el agua aplicada (Tabla V.15) reflejando el potencial productivo de la planta: las plantas más desarrolladas, con mayor altura, han tenido un mayor rendimiento en grano. Para cada varie-

dad y para cada año la relación fue lineal a excepción de la variedad Guadiamar en 2002, con una relación cuadrática.

En 2001 la altura del cultivo cinco semanas después de la siembra apenas alcanzaba los 20 cm (Figura V.12). Se observa que conforme pasa el tiempo las plantas de arroz en los tratamientos más alejados de la fuente lineal de aspersión dejan de crecer e incluso en la variedad Gladio las plantas mueren en los extremos de la fuente lineal (tratamientos T6 y T7).

La variedad más alta en 2001 fue Balilla x Sollana (88 cm), seguida de Guadiamar (55 cm), siendo la más baja Gladio (50 cm), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el ensayo de variedades, descrito en el Capítulo IV. En los años 2002 y 2004 el comportamiento de la altura del cultivo fue similar al del 2001. En 2002, año con menores producciones de grano, también se obtuvieron menores valores en la altura máxima alcanzada, con 34 y 31 cm para Guadiamar y Gladio respectivamente (Figura V.13). En 2004 la variedad que alcanzó mayor altura fue Loto (46 cm) (Figura V.14) Hay que destacar que la altura en 2002 y 2004 se midió como la distancia del suelo hasta la base de la panícula y en el año 2001 se midió hasta el extremo superior de la planta.

Tabla V.15. Ecuaciones de regresión entre la altura de la planta una vez alcanzado el pleno desarrollo (cm) y la dosis de agua aplicada en riego y precipitación (mm).

Fecha	Variedad	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
10/09/01	BxS	$h = - 11,66 + 0,103 \cdot (R+Pr)$	0,97	***
	Gladio	$h = 3,62 + 0,051 \cdot (R+Pr)$	0,94	***
	Guadiamar	$h = - 6,89 + 0,067 \cdot (R+Pr)$	0,89	***
07/10/02	Gladio	$h = 4,71 + 0,022 \cdot (R+Pr)$	0,99	***
	Guadiamar	$h = -3,57 + 0,067 \cdot (R+Pr) - 0,000033 \cdot (R+Pr)^2$	0,98	**
21/09/04	Guadiamar	$h = 11,04 + 0,023 \cdot (R+Pr)$	0,85	***
16/09/04	Loto	$h = 12,90 + 0,027 \cdot (R+Pr)$	0,94	***

h: altura; *R*: riego; *Pr*: precipitación. Nivel de significación: **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$).

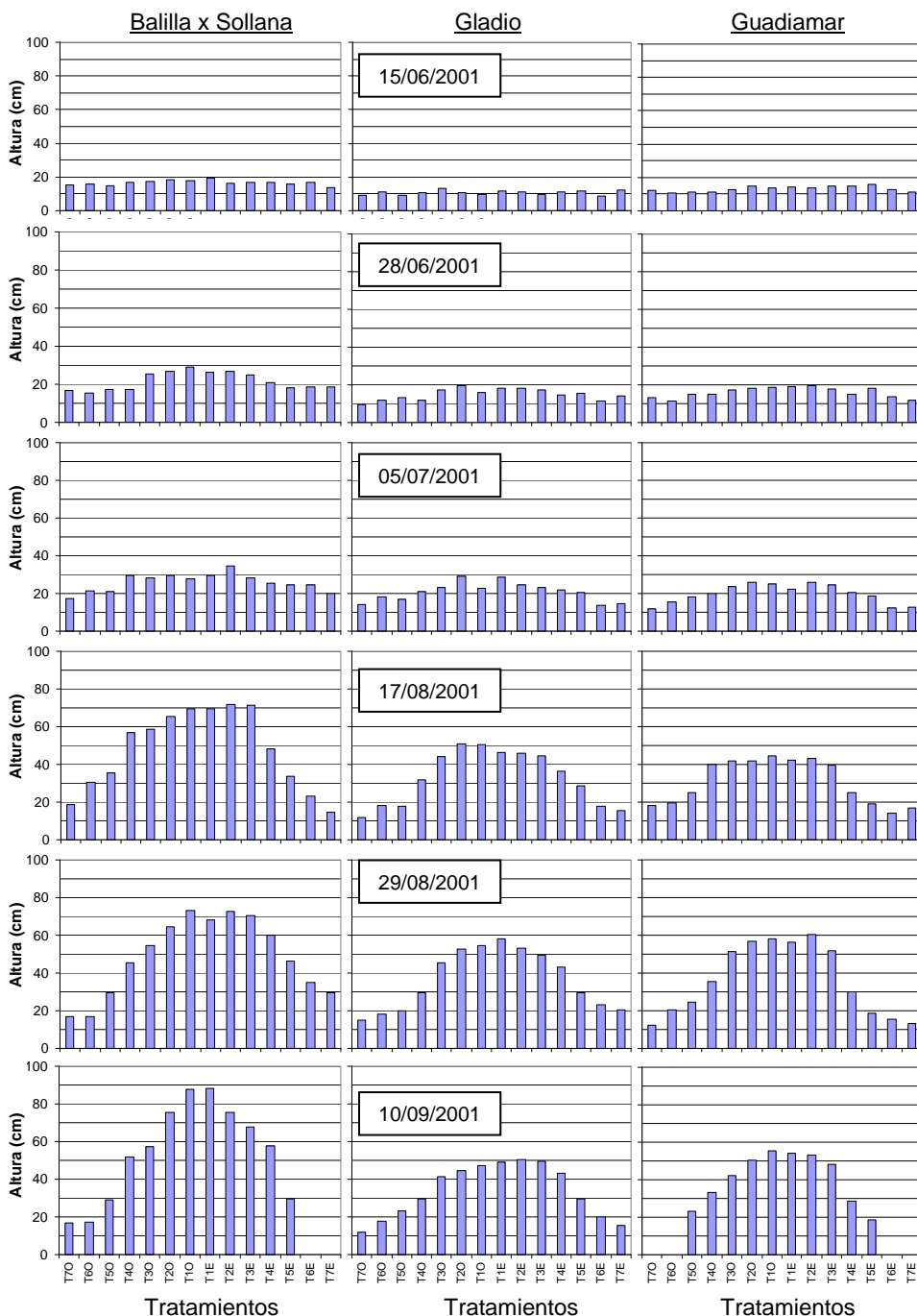


Figura V.12. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2001 de las variedades Balilla x Sollana, Gladio y Guadamar en los distintos tratamientos de riego.

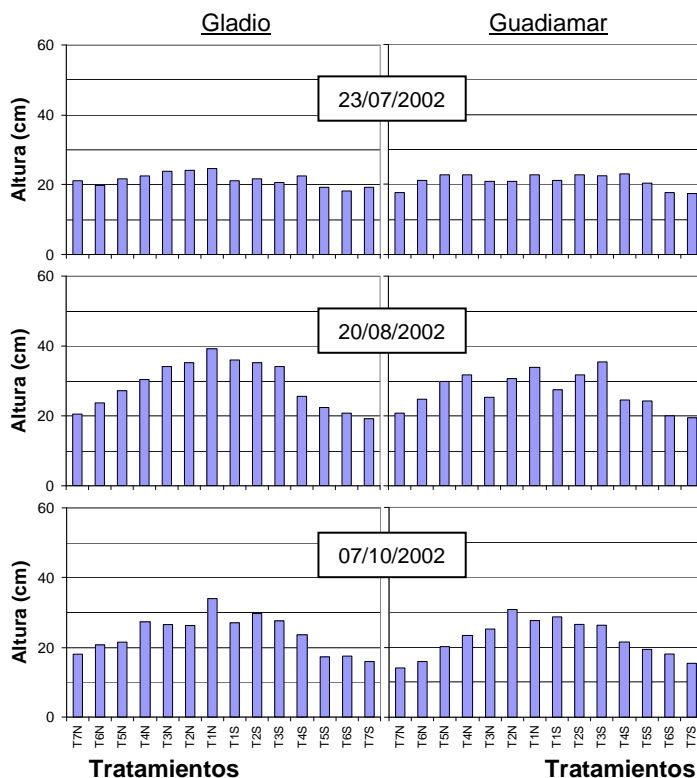


Figura V.13. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2002 de las variedades Gladio y Guadiamar en los distintos tratamientos. En la última fecha, la medida de planta se hizo hasta la base de la panícula. En las demás fechas, la medida se hizo hasta la última hoja.

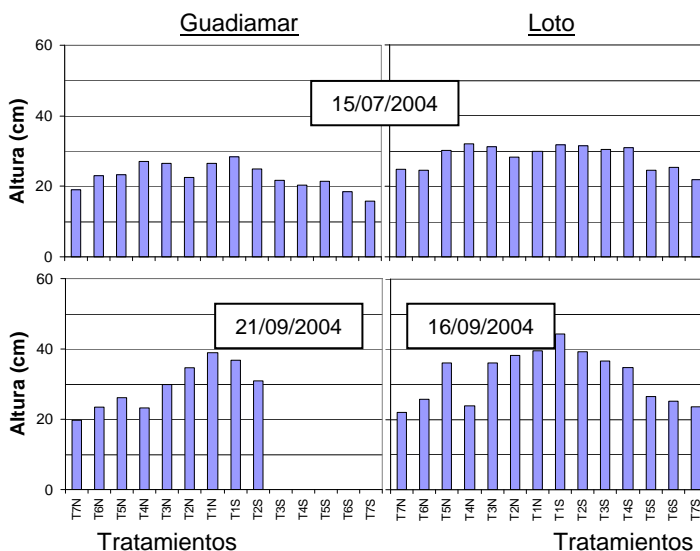


Figura V.14. Altura media de planta a lo largo del ciclo del cultivo en la campaña 2004 de las variedades Guadiamar y Loto en los distintos tratamientos.

En la Figura V.15 se presenta la relación entre el riego más la precipitación con la altura final de las plantas y con la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR), una vez alcanzada la máxima cobertura del suelo, en las distintas variedades en las campañas 2001, 2002 y 2004. Al aumentar el agua recibida por las plantas aumentó significativamente ($p < 0,05$) su altura y el IPAR. Este incremento se dio de manera lineal para la altura todos los años y para cada variedad, excepto en 2002 con la variedad Guadiamar como ya se ha señalado con anterioridad. Para el IPAR en 2001 esta relación fue también lineal y las pendientes de los modelos de regresión para cada variedad no fueron significativamente distintas. En 2002 y 2004 la relación fue cuadrática. Los coeficientes de determinación de las regresiones fueron en todos los casos superiores a 0,85 para la altura (Tabla V.15) y 0,89 para el IPAR (Tabla V.16).

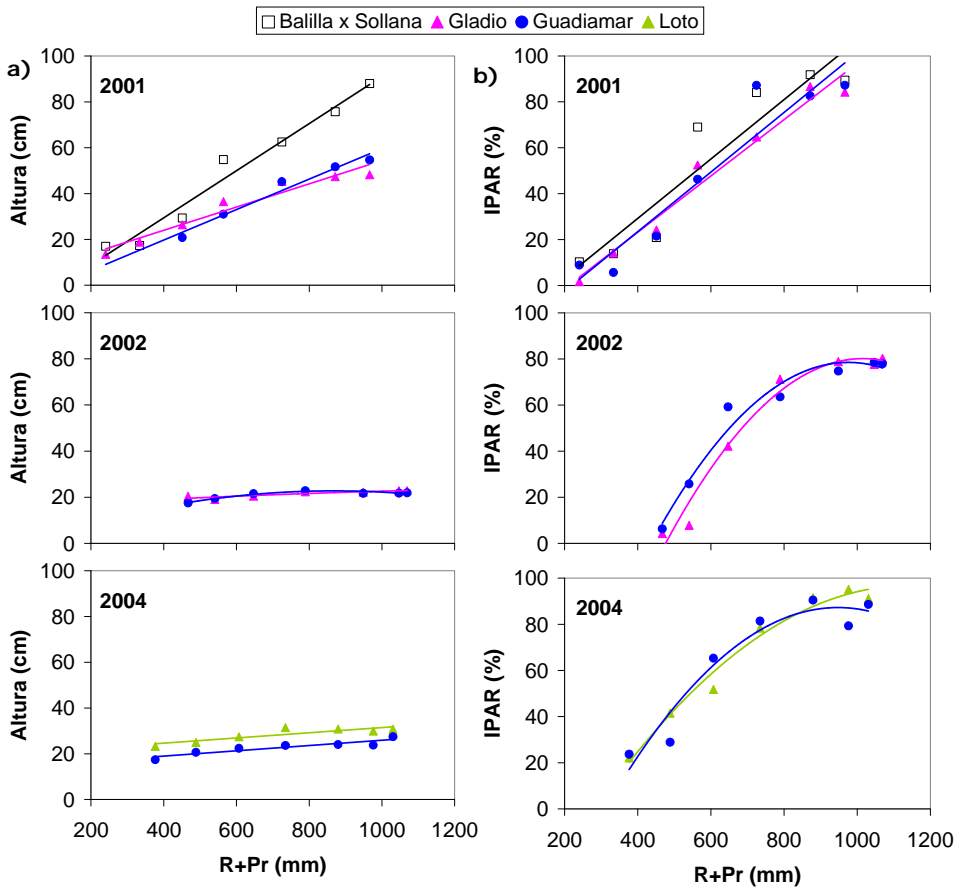


Figura V.15. Relación entre a) la altura final de las plantas y b) la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) con el agua aplicada (riego más precipitación (R+Pr)) en las variedades ensayadas en las tres campañas estudiadas.

Tabla V.16. Relación entre el valor del PAR interceptado (IPAR, %) en floración y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).

Año	Variedad	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
23/08/01	‡	IPAR = -25,7 + 0,12·(R+Pr)	0,91	****
	BxS	IPAR = - 22,6 + 0,13·(R+Pr)	0,89	***
	Gladío	IPAR = - 25,9 + 0,12·(R+Pr)	0,97	***
	Guadamar	IPAR = - 28,5 + 0,13·(R+Pr)	0,91	***
19/09/02	Gladío	IPAR = -182,3+0,54·(R+Pr)- 0,00028·(R+Pr) ²	0,97	****
	Guadamar	IPAR = -178,8 + 0,53·(R+Pr) - 0,00027·(R+Pr) ²	0,97	***
19/08/04	Guadamar	IPAR = -106,2 + 0,41·(R+Pr) - 0,00022·(R+Pr) ²	0,93	*
	Loto	IPAR = -73,7 + 0,30·(R+Pr) - 0,00013·(R+Pr) ²	0,98	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); ***: ($p < 0,001$); ****: ($p < 0,0001$). ‡: Las pendientes de cada variedad por separado no son significativamente diferentes ($p < 0,05$) por lo que se incluye el modelo con todas las variedades.

V.3.5. Rendimiento, biomasa e índice de cosecha del arroz.

La Figura V.16 presenta las relaciones obtenidas entre el rendimiento en grano, la producción de biomasa aérea y el índice de cosecha con la altura estacional de agua aplicada (riego y precipitación), para las distintas variedades estudiadas y campañas de ensayos realizadas. En todos los casos se ha encontrado que una relación de tipo lineal es la que mejor se ajusta a los resultados obtenidos (Tabla V.17). Para cada año las pendientes de las rectas son muy similares en las distintas variedades, con alguna excepción como el caso del rendimiento en grano en 2001 y 2002 en que Guadamar tuvo una mayor respuesta al agua aplicada que Gladío. Estas relaciones muestran que para el rango de valores de riego utilizado en los ensayos, al aumentar la cantidad estacional de agua aplicada aumenta el rendimiento en grano, la producción de biomasa aérea y el índice de cosecha.

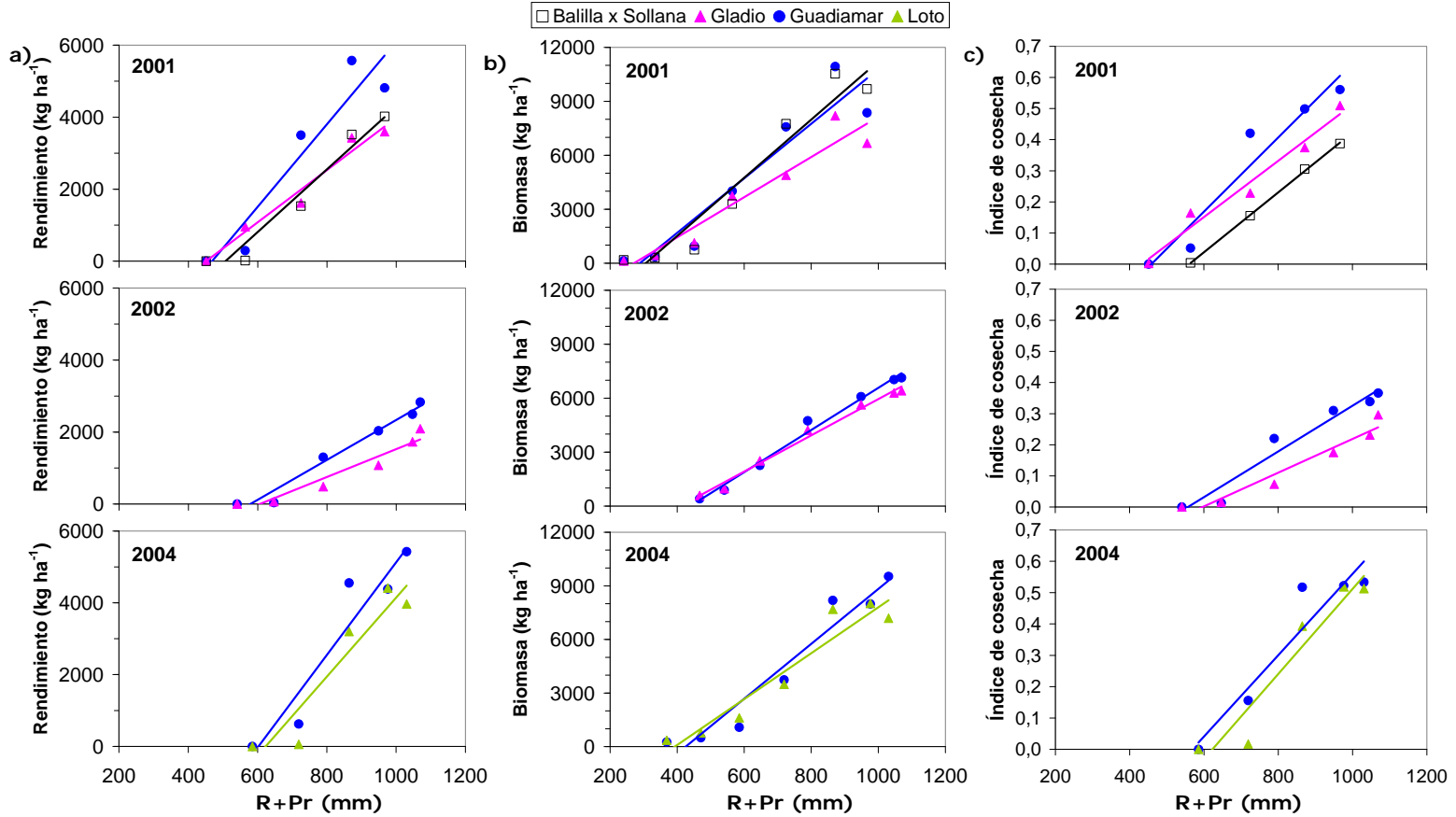


Figura V.16. a) Rendimiento en grano (14% de humedad), b) biomasa aérea y c) índice de cosecha de las distintas variedades en función del agua aplicada (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.

En las tres campañas de riego estudiadas, las dosis estacionales de agua aplicada menores de 500 mm dieron rendimientos de arroz prácticamente nulos. La aplicación de dosis de agua de riego de 700-900 mm dio lugar a los mayores aumentos de rendimiento en grano. Sin embargo y a partir de ahí, no siempre las dosis máximas de riego aplicado estuvieron asociadas a los valores máximos del rendimiento en grano. La producción de biomasa y el índice de cosecha tuvieron un comportamiento muy similar al del rendimiento en grano para los tres años de estudio, aumentando conforme aumentaba la cantidad aplicada en riego. Sin embargo, la producción de biomasa fue bastante parecida entre años y variedades, mientras que el índice de cosecha varió entre años y entre variedades. En los años 2001 y 2004 el índice de cosecha alcanzó valores máximos próximos a 0,6 mientras que en el año 2002 no llegaron a alcanzarse valores de 0,4. En el año 2001 la variedad Gladio tuvo un índice de cosecha inferior a los obtenidos en las variedades Guadiamar y Balilla x Sollana.

En el año 2002 los rendimientos en todos los tratamientos del ensayo fueron inferiores a los obtenidos en los años 2001 y 2004. Estos menores rendimientos en 2002 fueron debidos a un retraso en la fecha de siembra y a las bajas temperaturas registradas durante el verano que dieron lugar a un retraso en la fecha de floración (tuvo lugar a finales de agosto en la variedad Guadiamar, que es la de ciclo más corto), lo cual afectó negativamente al cuajado dando lugar a un índice de cosecha bajo.

Todas las ecuaciones de regresión lineal de los parámetros estudiados y para cada una de las variedades y años de ensayo han sido significativas con niveles de significación inferiores o iguales a 0,05 y valores de R^2 comprendidos entre 0,89 y 0,97 (Tabla V.17). Las pendientes de las regresiones obtenidas son positivas en todos los casos, lo cual indica que dentro de los rangos de riego estudiados el aumento de agua aplicada supuso un aumento del rendimiento, biomasa e índice de cosecha. Hay que destacar, sin embargo, que en la zona de rendimientos máximos existió una dispersión considerable de los datos. La variedad más productiva ha resultado Guadiamar, que dio lugar a un mayor rendimiento, producción de biomasa aérea e índice de cosecha que el resto de variedades estudiadas a igualdad de dosis de agua aplicada en los tres años de estudio, excepción del primer año en la producción de biomasa, en que la variedad Balilla x Sollana fue superior.

Tabla V.17. Parámetros de la regresión lineal entre el rendimiento en grano (kg ha^{-1}), la producción de biomasa aérea (kg ha^{-1}) y el índice de cosecha y la dosis de agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr, mm).

	Variedad	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
Rendimiento				
2001	BxS	Rdto = $-4.412 + 8,70 \cdot (R+Pr)$	0,90	**
	Gladio	Rdto = $-3.270 + 7,25 \cdot (R+Pr)$	0,97	**
	Guadamar	Rdto = $-5.359 + 11,45 \cdot (R+Pr)$	0,90	*
2002	Gladio	Rdto = $-2.343 + 3,87 \cdot (R+Pr)$	0,93	**
	Guadamar	Rdto = $-3.201 + 5,54 \cdot (R+Pr)$	0,97	**
2004	Guadamar	Rdto = $-7.779 + 12,91 \cdot (R+Pr)$	0,90	*
	Loto	Rdto = $-6.871 + 11,02 \cdot (R+Pr)$	0,89	*
Biomasa				
2001	BxS	Biom = $-4.984,7 + 16,17 \cdot (R+Pr)$	0,93	***
	Gladio	Biom = $-3.027,2 + 11,17 \cdot (R+Pr)$	0,92	***
	Guadamar	Biom = $-4.374,6 + 15,60 \cdot (R+Pr)$	0,89	**
2002	Gladio	Biom = $-4.126,2 + 10,08 \cdot (R+Pr)$	0,99	***
	Guadamar	Biom = $-5.146,1 + 11,72 \cdot (R+Pr)$	0,99	***
2004	Guadamar	Biom = $-6.530,9 + 15,35 \cdot (R+Pr)$	0,94	***
	Loto	Biom = $-5.034,9 + 12,84 \cdot (R+Pr)$	0,92	***
Índice de cosecha				
2001	BxS	IC = $-0,54 + 0,0010 \cdot (R+Pr)$	0,99	***
	Gladio	IC = $-0,39 + 0,0009 \cdot (R+Pr)$	0,97	**
	Guadamar	IC = $-0,55 + 0,0012 \cdot (R+Pr)$	0,93	**
2002	Gladio	IC = $-0,32 + 0,0005 \cdot (R+Pr)$	0,95	**
	Guadamar	IC = $-0,41 + 0,0007 \cdot (R+Pr)$	0,95	***
2004	Guadamar	IC = $-0,74 + 0,0013 \cdot (R+Pr)$	0,90	*
	Loto	IC = $-0,84 + 0,0014 \cdot (R+Pr)$	0,92	*

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$), **: ($p < 0,01$), ***: ($p < 0,001$).

V.3.6. Componentes del rendimiento.

En el caso del número de panículas por metro cuadrado y el peso de mil granos, también se encontró que existía una relación de tipo lineal entre estos componentes del rendimiento y la dosis estacional de agua aplicada en riego y precipitación. Los resultados muestran que el número de panículas m^{-2} se redujo de forma drástica al reducir la cantidad de agua aplicada. El peso de mil granos también se vio afectado de forma similar pero el efecto del riego no fue tan acusado (Figura V.17).

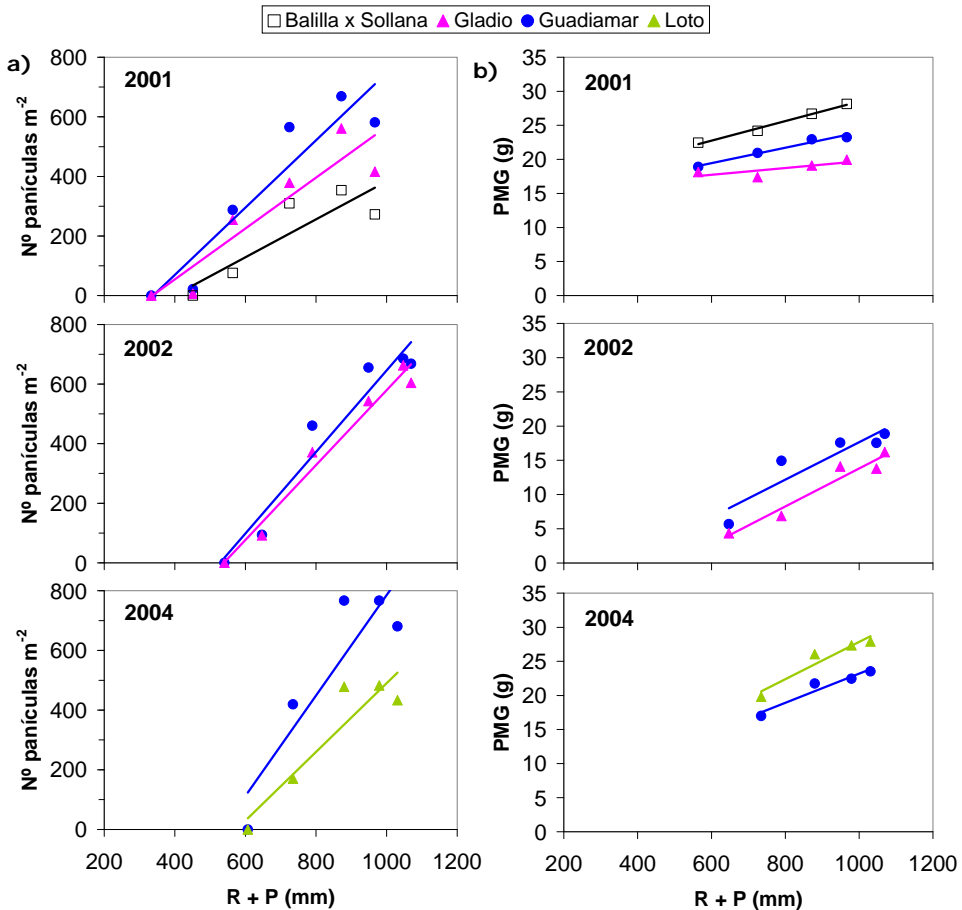


Figura V.17. Relación entre a) la densidad de panículas y b) el peso de mil granos de las distintas variedades con el agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.

Todas las ecuaciones de regresión lineal fueron significativas ($p < 0,001$) con valores de R^2 comprendidos entre 0,57 y 0,97 (Tabla V.18). La variedad Guadiamar fue la de mayor respuesta al riego aplicado en cuanto a la densidad de panículas (mayores valores de la pendiente). Con la excepción de Gladio en el primer año, no se observaron diferencias entre variedades en la respuesta del peso de mil granos al agua aplicada (pendientes similares cada año). Las diferencias en el PMG entre variedades se debieron a las características del grano de cada variedad (Balilla x Sollana de grano redondo; Guadiamar y Loto de grano semilargo; Gladio de grano largo).

Tabla V.18. Parámetros de la regresión lineal entre los componentes del rendimiento (densidad de panículas (N°P) y peso de mil granos (PMG)) y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).

	Variedad	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
N° panículas m⁻²				
2001	BxS	N°P = -253,5 + 0,64·(R+Pr)	0,76	***
	Gladío	N°P = -287,7 + 0,86·(R+Pr)	0,85	***
	Guadamar	N°P = -383,3 + 1,13·(R+Pr)	0,89	***
2002	Gladío	N°P = -677,6 + 1,26·(R+Pr)	0,97	***
	Guadamar	N°P = -733,8 + 1,37·(R+Pr)	0,94	***
2004	Guadamar	N°P = -898,7 + 1,69·(R+Pr)	0,81	***
	Loto	N°P = -661,4 + 1,15·(R+Pr)	0,86	***
PMG (g)				
2001	BxS	PMG = -11,6 + 0,045·(R+Pr)	0,67	***
	Gladío	PMG = -6,5 + 0,030·(R+Pr)	0,57	ns
	Guadamar	PMG = -9,6 + 0,038·(R+Pr)	0,66	***
2002	Gladío	PMG = -15,3 + 0,029·(R+Pr)	0,97	*
	Guadamar	PMG = -16,0 + 0,034·(R+Pr)	0,90	***
2004	Guadamar	PMG = -25,6 + 0,050·(R+Pr)	0,81	***
	Loto	PMG = -31,2 + 0,061·(R+Pr)	0,82	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); ns: no significativo.

V.3.7. Productividad del agua aplicada.

La productividad del agua aplicada (riego y precipitación estacional) ha variado a lo largo de los años, siendo la más alta en el año el 2004, con valores alrededor del medio kilogramo de arroz producido por m³ de agua (riego + precipitación) (Tabla V.19). La campaña 2002 tuvo malos resultados productivos que se ven también reflejados en los bajos valores de productividad del agua, siendo cerca de un 50% inferior a los otros dos años.

Tabla V.19. Productividad del agua aplicada (riego y precipitación estacional (R+Pr)).

Trata- miento	Productividad del agua (R+Pr) (kg m ⁻³)						
	2001			2002		2004	
	BxS	Gladío	Guad	Gladío	Guad	Guad	Loto
T1	0,416	0,374	0,499	0,196	0,265	0,527	0,487
T2	0,400	0,387	0,644	0,165	0,205	0,453	0,401
T3	0,202	0,209	0,471	0,113	0,161	0,427	0,402
T4	0,003	0,153	0,047	0,060	0,141	0,332	0,096
T5	0	0	0	0,010	0,077	0,050	0
T6	0	0	0	0	0,019	0	0
T7	0	0	0	0	0	0	0

BxS: Balilla x Sollana; Guad: Guadamar.

Para las distintas variedades y años de estudio se encontró que existía una relación de tipo lineal entre la productividad del agua aplicada y las alturas estacionales de agua aplicada en riego y precipitación. Los resultados mues-

tran que la productividad aumenta con el agua aplicada (Figura V.18). Todas las ecuaciones de regresión lineal fueron significativas ($p < 0,001$) con valores de R^2 comprendidos entre 0,68 y 0,86 (Tabla V.20). Los valores más elevados de la productividad del agua aplicada se han conseguido todos los años con la variedad Guadiamar y los inferiores con la variedad Gladio. La variedad Loto en el año 2004 alcanzó valores de productividad del agua similares a Guadiamar. Se alcanzaron valores máximos de $0,64 \text{ kg m}^{-3}$ con aplicaciones de agua de 872 mm en 2001 y de $0,53$ con 1.030 mm en 2004 (Figura V.18 y Tabla V.20). Solamente en el caso de la variedad Guadiamar en uno de los años (2001) se observó que la mayor productividad del agua aplicada no se produjo con la mayor dosis de agua aplicada sino en el tratamiento T2.

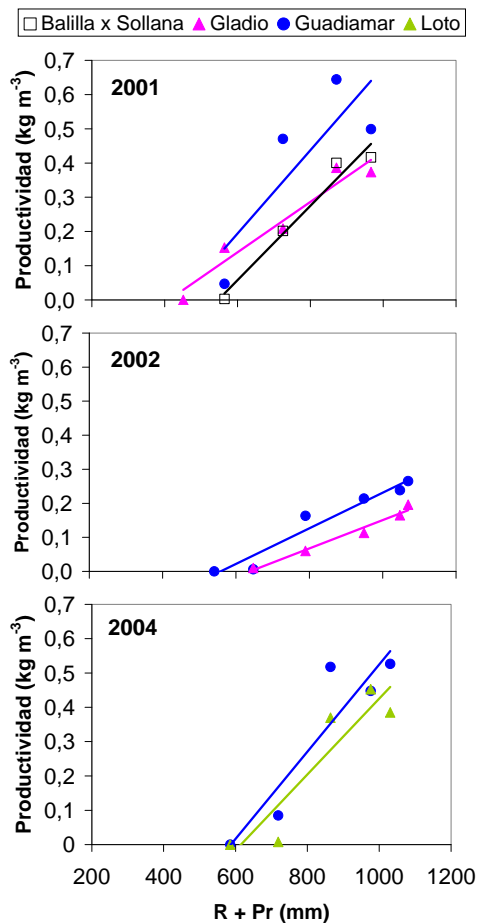


Figura V.18. Relación entre la productividad del agua de las distintas variedades y el agua aplicada en riego y precipitación (R+Pr) en las campañas 2001, 2002 y 2004.

Tabla V.20. Parámetros de la regresión lineal entre la productividad del agua (kg m^{-3}) y la dosis de agua aplicada (riego + precipitación (R+Pr), mm).

	Variedad	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
2001	BxS	Prod_Agua = -0,244 + 0,0007·(R+Pr)	0,80	***
	Gladío	Prod_Agua = -0,220 + 0,0006·(R+Pr)	0,68	***
	Guadamar	Prod_Agua = -0,322 + 0,0009·(R+Pr)	0,74	***
2002	Gladío	Prod_Agua = -0,177 + 0,0003·(R+Pr)	0,69	***
	Guadamar	Prod_Agua = -0,252 + 0,0005·(R+Pr)	0,77	***
2004	Guadamar	Prod_Agua = -0,417 + 0,0008·(R+Pr)	0,86	***
	Loto	Prod_Agua = -0,381 + 0,0008·(R+Pr)	0,83	***

*Prod_Agua: productividad del agua. Nivel de significación: ***: (p<0,001).*

V.4. DISCUSIÓN.

La distribución del agua de riego a ambos lados de la fuente lineal de aspersión fue muy similar y tuvo una forma de campana con un descenso lineal del agua aplicada al alejarse de la fuente lineal. Por ello, las localizaciones situadas a ambos lados de la fuente lineal de aspersión pudieron considerarse como repeticiones de las distintas dosis de riego aplicadas

El régimen de riego impuesto en los distintos tratamientos con la fuente lineal de aspersión produjo un importante efecto en el estado hídrico del suelo a lo largo del ciclo del cultivo. Los tratamientos más cercanos a la fuente lineal de aspersión mantuvieron unos niveles de humedad, en el suelo, más altos que los tratamientos menos regados. Las lecturas del potencial mátrico del suelo con los sensores Watermark y las lecturas de humedad del suelo con la sonda Diviner 2000 mostraron claramente diferencias importantes en el estado hídrico del suelo en los diferentes tratamientos. En algunos casos se observa un comportamiento algo errático de las medidas del potencial hídrico del suelo. Así en los tratamientos con menor riego aplicado (T5, T6 y T7) a veces se observaron valores altos del potencial hídrico lo cual puede ser debido a que al verse reducido el crecimiento cultivo de forma temprana, la extracción de agua por el mismo en estos tratamientos fue muy escasa y el agua caída en riegos posteriores no pudo ser utilizada por el cultivo. Esto está relacionado con el hecho de que el arroz concentra la mayor parte de las raíces en los primeros 30 cm de profundidad (Figura V.10), por lo que la extracción de agua de horizontes más profundos fue poco importante.

La utilización de los sensores de matriz granular Watermark conectados a la estación MicroIris no ha resultado muy adecuada para medir el estado hídrico del suelo en los tratamientos menos regados por tener un rango de medidas limitado a -0,12 MPa. Con frecuencia las lecturas del potencial hídrico del suelo disminuyeron por debajo de este límite. El mayor rango de lecturas de humedad del suelo de la sonda portátil Diviner 2000 permitió analizar la evolución de la humedad del suelo a lo largo del ciclo del arroz.

El riego diferencial produjo un importante efecto en la altura de la planta, PAR interceptado, rendimiento en grano, producción de biomasa aérea, número de panículas, peso de mil granos, índice de cosecha y productividad del agua aplicada. Para todos estos parámetros productivos se encontró en general que existía una relación de tipo lineal con el agua aplicada en riego y precipitación. Cuanto mayor era la cantidad de agua aplicada, mayor era el valor de la variable considerada. Estas regresiones lineales tuvieron en todos los casos altos valores de los coeficientes de determinación.

La variedad Guadiamar dio lugar a un mayor rendimiento que el resto de variedades estudiadas a igualdad de dosis de agua aplicada en los tres años de estudio. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el ensayo de variedades. Los valores máximos del rendimiento en grano de esta variedad fueron alrededor de un 20% inferiores a los obtenidos en zonas próximas en riego por inundación.

En el año 2001 los valores máximos del rendimiento en arroz cáscara fueron de 6 t ha^{-1} en la variedad Guadiamar y del orden 4 t ha^{-1} en Gladio y Balilla x Sollana. En el año 2002 debido a un problema de mala fecundación por problemas de bajas temperaturas, los rendimientos máximos de arroz cáscara no superaron las 4 t ha^{-1} en Guadiamar y las 3 t ha^{-1} en Gladio. En el año 2004 se volvió a obtener un rendimiento máximo de 6 t ha^{-1} en Guadiamar y en la variedad Loto se llegó a obtener 5 t ha^{-1} . En los tres años la pendiente de la regresión lineal entre rendimiento y agua aplicada fue mayor en la variedad Guadiamar comparada con las demás variedades indicando que esta variedad fue la que tuvo una mayor respuesta al agua aplicada en riego por aspersión. La variedad Guadiamar fue superior a las demás variedades estudiadas en la producción de biomasa aérea, en el número de espigas por m^2 , en el índice de cosecha y en la productividad del agua. En el rango de agua aplicada estudiado, para las dosis más altas (T1 y T2) parece que se estabiliza la producción, lo cual ocurre con casi todas las especies cuando el riego y precipitación sobrepasan las necesidades del cultivo (Rowe y Johnson, 1992; Blanco *et al.*, 1995; Mata *et al.*, 2006; Finger, 2007).

En cuanto a la productividad del agua aplicada, el año con peores resultados fue 2002, con un máximo de $0,26 \text{ kg m}^{-3}$, para la variedad Guadiamar y $0,20 \text{ kg m}^{-3}$ para la variedad Gladio, datos que provienen de los bajos valores de producción alcanzados en ese año. Sin embargo, los valores máximos obtenidos en 2001 y 2004 fueron de más del doble, de $0,64 \text{ kg m}^{-3}$ para la variedad Guadiamar, similares a los obtenidos en Aragón por Martínez-Cob y Perez Coveta (2006) y en India por Kahlowan *et al.* (2007). Los valores de agua de riego aportada en el cultivo del arroz bajo riego por inundación en el Valle medio del Ebro, estimados por Salvador *et al.* (2011), tienen una alta variabilidad, con un valor medio de $11.404 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y una desviación estándar de $3.847 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por lo que la productividad del agua aplicada es por tanto muy variable. En la revisión de valores de productividad del agua de distintos culti-

vos de Zwart y Bastiaanssen (2004), se manifiesta también una gran variabilidad de estos valores en arroz bajo riego por inundación, entre 0,6 y 1,6 kg m⁻³, lo cual subrayan también Cai y Sharma (2010). Hay que tener en cuenta que los valores de productividad del agua del presente trabajo incluye también el agua de lluvia, la cual no es tenida en cuenta en otros trabajos. Valores obtenidos por Bueno *et al.* (2010) en el trópico, arrojan cifras de productividad del agua superiores en ensayos de ahorro de agua frente a la inundación tradicional, mayores en aquellos genotipos seleccionados para un menor consumo de agua.

V.5. CONCLUSIONES.

El régimen de riego impuesto en los distintos tratamientos con la fuente lineal de aspersión produjo un importante efecto en el estado hídrico del suelo a lo largo del ciclo del cultivo.

Para el rango de valores del riego aplicado en los ensayos, se encontró una relación de tipo lineal entre la cantidad estacional de agua aplicada en riego y precipitación y la altura de la planta, la fracción de PAR interceptado, el rendimiento en grano, la producción de biomasa aérea, número de panículas, peso de mil granos, índice de cosecha y la productividad del agua aplicada.

Las aplicaciones de agua de riego inferiores a 500 mm no llegaron a producir cosecha alguna.

Los niveles de agua de riego con los que se ha conseguido el máximo rendimiento han estado comprendidos entre 700 y 900 mm, dosis que son entre un 100 y 30% inferiores a las utilizadas en los sistemas de riego por inundación en zonas limítrofes, que llegan a aplicar entre 1100 y 1600 mm.

La variedad más productiva bajo riego por aspersión resultó Guadiamar, con un rendimiento cercano a los 6.000 kg ha⁻¹ en dos de los tres años de estudio, lo que ha supuesto un rendimiento del mismo nivel respecto a la producción media en los sistemas de riego por inundación en zonas limítrofes.

La productividad del agua (riego más precipitación estacional) en los tratamientos más regados ha sido adecuada, siendo Guadiamar y Loto las variedades con mejor respuesta con valores en torno a 0,5 kg m⁻³.

Los resultados del trabajo de la respuesta del arroz a distintas dosis de riego por aspersión muestran que la producción de arroz con riego por aspersión es viable pero es necesario un buen establecimiento del cultivo en la fase inicial, unas cantidades de agua de riego y precipitación que cubran las necesidades hídricas y un control exhaustivo de las malas hierbas con eficaces tratamientos herbicidas.

CAPÍTULO VI.

**EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN
NITROGENADA Y FOSFÓRICA EN
EL ARROZ REGADO POR
ASPERSIÓN.**

VI.1. INTRODUCCIÓN.

En el arroz bajo riego por aspersión es previsible que se produzcan cambios en las pérdidas de nutrientes y variaciones en su disponibilidad para las plantas con respecto al riego por inundación. Estos cambios pueden deberse a que desaparece la lámina de agua presente en el arroz bajo riego por inundación, lámina que crea unas condiciones de anaerobiosis, y a que no es necesario crear la capa de fangueo típica en los arrozales tradicionales. También cabe esperar que desaparezcan las pérdidas de N por escorrentía superficial y que se reduzcan las pérdidas por volatilización y desnitrificación que se han descrito en el cultivo tradicional (Minzoni *et al.*, 1988; Freney *et al.*, 1990; Aulakh y Singh, 1996; Cho, 2003; Choudhury y Kennedy, 2005). No obstante, las pérdidas por percolación bajo la zona de raíces pueden aumentar, dada la escasa profundidad de desarrollo de éstas y el aumento de la nitrificación.

Como se ha reiterado a lo largo de esta tesis con la información sobre la adaptación de variedades y de la dosis de agua requerida en el arroz cultivado bajo riego por aspersión, por no ser el sistema tradicional de cultivo existe poca información sobre el efecto de los fertilizantes en el crecimiento y la producción del arroz. En la bibliografía disponible, Wescott y Vines (1986) sugieren que la menor disponibilidad de nutrientes, al cambiar del medio inundado al no inundado, puede ser una de las causas del menor rendimiento cuando el riego del arroz se realiza por aspersión. Así, las recomendaciones de abonado para el arroz bajo inundación no tienen por qué ser las mismas que en riego por aspersión.

Ferguson y Gilmour (1978) observaron que cuando las dosis aplicadas de N fueron altas (del orden de 135 kg ha^{-1}), las pérdidas de N fueron similares en el riego por aspersión y en el riego por inundación. El fraccionamiento del N fertilizante y la aplicación de una dosis adecuada podrían limitar estas pérdidas. Wescott y Vines (1986) indican que la aplicación fraccionada del N incrementa los rendimientos del arroz bajo riego por aspersión y diversos autores también recomiendan su fraccionamiento (Battilani y Pietrosi, 1990; Spanu y Pruneddu, 1997; Guiducci *et al.*, 1999).

El caso del fósforo puede ser particularmente importante en las condiciones edáficas del valle medio del Ebro donde predominan los suelos calcáreos con un pH alto. En dichos suelos, el fósforo está presente predominantemente en forma de fosfato cálcico, muy poco soluble, pudiendo llegar a ser el factor más limitante de la producción aunque con bajo riesgo de pérdidas por lavado (Betrán Aso, 2006). En la Tabla VI.1 se muestra una interpretación de niveles de fósforo en el suelo en función de la textura para cultivos extensivos.

Tabla VI.1. Interpretación del análisis de P Olsen en el suelo en función de la textura para cultivos extensivos (López Ritas y López Melida, 1978).

Textura	Contenido de P Olsen (ppm)				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Gruesa y media	<5	5-14	15-24	25-34	>34
Fina	<3	3-7	8-12	13-17	>17

Slaton *et al.* (2002) encontraron respuestas importantes al P en arroz cultivado bajo inundación en suelos alcalinos. Dado que gran parte de los ensayos realizados sobre arroz en riego por aspersión en el mundo se han hecho sobre suelos de pH ácido en Estados Unidos (Akkari *et al.*, 1986; Wescott y Vines, 1986; McCauley, 1990), Australia (Muirhead *et al.*, 1989) y Brasil (Crusciol *et al.*, 2003a, 2003b), la importancia de la fertilización fosfórica no se ha puesto de manifiesto, aunque en el estudio de Australia el arroz fue deficiente en fósforo. Los estudios realizados en Italia, donde se han obtenido altos rendimientos (mayores de 7,0 t ha⁻¹) (Battilani y Pietrosi, 1990; Spanu y Pruneddu, 1996; Spanu y Murtas, 2002), se han hecho sobre suelos con pH neutro o alcalino pero con altos contenidos en fósforo (mayores de 80 ppm P₂O₅ Olsen) y con dosis de abonado de 100 kg P₂O₅ ha⁻¹.

Dobermann y Fairhurst (2000) describen ampliamente la función y manejo de nutrientes y los trastornos nutricionales en arroz, principalmente en los ecosistemas más frecuentes de cultivo, destacando las siguientes propiedades. El N afecta a todos los parámetros que contribuyen al rendimiento y los mayores requerimientos se producen entre inicio de ahijado e inicio de formación de la panícula. El P promueve el ahijado, el desarrollo de las raíces, una floración temprana y la maduración, entre otros. Es particularmente importante en los estadios de crecimiento iniciales. El K incrementa el número de espiguillas por panícula, el porcentaje de granos llenos y del PMG y hace más resistente a la planta a condiciones climáticas adversas, encharcado, plagas y enfermedades. El Ca participa en el mantenimiento de la biomembrana, activa enzimas, es necesario para la osmoregulación y el balance catión-anión en las células. Además, incrementa la resistencia de la planta a enfermedades. El Mg activa numerosas enzimas e interviene en la asimilación de CO₂ y la síntesis de proteínas. Su deficiencia es más probable en suelos aeróbicos que en suelos inundados, por su aporte en el agua de riego. El Fe es esencial en la fotosíntesis y su deficiencia puede inhibir la absorción de K. Su deficiencia es más frecuente en suelos aeróbicos, pues la solubilidad del mismo aumenta con la inundación. El Mn está involucrado en las reacciones de oxidoreducción y el intercambio de O₂ en la fotosíntesis y previene la toxicidad del Fe. Plantas con deficiencia en este nutriente también son deficientes en P. El Cu es clave en el metabolismo del N, en la fotosíntesis, en la formación de polen y su fertilidad. Interviene en el ahijado y en la esterilidad de las espiguillas y tiene poca movilidad en la planta si hay deficiencia en N. El Zn es esencial en varios procesos bioquímicos. La deficiencia severa de Zn provoca disminución del ahijado, llegando a

detenerlo, alarga el ciclo del cultivo y aumenta la esterilidad de las espiguillas. Esta deficiencia es más frecuente en suelos neutros o calcáreos con alto contenido en bicarbonatos y en suelos salino sódicos.

El objetivo de este trabajo es establecer el programa de fertilización más adecuado para el correcto abonado en el cultivo de arroz regado por aspersión, mediante el estudio del efecto de distintas dosis de abonado nitrogenado y fosfórico y el estudio del efecto de distintos fraccionamientos del abonado nitrogenado, así como estudiar su repercusión sobre la absorción de otros macro y micronutrientes.

VI.2. MATERIAL Y MÉTODOS.

VI.2.1. Localización de los ensayos.

Se realizaron ensayos de campo durante los años 2002, 2003 y 2004 en la finca experimental de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) en Montañana (Zaragoza), en dos parcelas contiguas, cuyas características están descritas en el Capítulo III.

VI.2.2. Diseño experimental. Fertilización.

Se realizaron dos ensayos cada año, uno para determinar la respuesta del arroz a la fertilización nitrogenada y fosfórica y otro para comprobar la respuesta al fraccionamiento de la aplicación del nitrógeno (Figura VI.1).

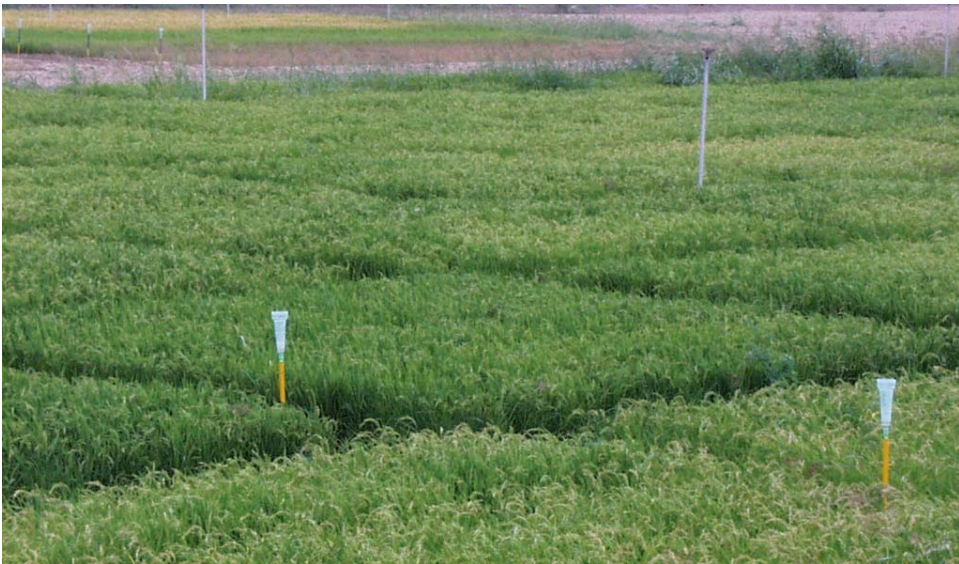


Figura VI.1. Vista general del ensayo de fertilización. Campaña 2004.

- Ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica

En el ensayo de respuesta al N y P se estudiaron 4 dosis de nitrógeno (100, 150, 200 y 250 kg N ha⁻¹ en 2002; 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹ en 2003 y 2004) y 3 dosis de fósforo (0, 75, 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ en los tres años de ensayos) en un diseño factorial en bloques al azar con 3 repeticiones, siendo la parcela elemental de 20 m² (Tabla VI.2).

Tabla VI.2. Tratamientos de fertilización nitrogenada y fosfórica en los tres años de ensayo.

Tratamiento	2002		2003 y 2004	
	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)
1	100	150	50	150
2	150	150	100	150
3	200	150	150	150
4	250	150	200	150
5	100	75	50	75
6	150	75	100	75
7	200	75	150	75
8	250	75	200	75
9	100	0	50	0
10	150	0	100	0
11	200	0	150	0
12	250	0	200	0

El nitrógeno se aplicó en forma de nitrato amónico (33% N) en forma granulada, la mitad en fondo y la otra mitad al inicio del ahijado del arroz. El fósforo se aplicó en forma de superfosfato triple (18% P₂O₅), en fondo. Todas las parcelas se abonaron en fondo con 100 kg K₂O ha⁻¹ como cloruro potásico (60% K₂O).

- Ensayo de fraccionamiento del nitrógeno

El tipo de abono nitrogenado, fosfórico y potásico fue el mismo que en el ensayo anterior. Las dosis de fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O) fueron de 100 kg ha⁻¹ de cada uno.

Respecto al abonado nitrogenado, en este ensayo se aplicaron en total 150 kg de N ha⁻¹ que se fraccionaron de la siguiente forma: a) tratamiento 1: se aplicó todo el N en fondo; b) tratamiento 2: se aplicó la mitad en fondo y la otra mitad al inicio del ahijado del arroz; c) tratamiento 3 se aplicó la mitad en fondo y el resto en dos coberteras, la primera al inicio del ahijado y la segunda al inicio de la formación de la panícula del arroz (Tabla VI.3).

En este ensayo el diseño fue en bloques al azar con 4 repeticiones y una parcela elemental de 20 m².

Tabla VI.3. Tratamientos en el ensayo de fraccionado del N en los tres años de ensayo, en fondo, a inicio del ahijado del arroz (Cobertera 1) y a inicio de formación de la panícula del arroz (Cobertera 2).

Tratamiento	N (kg ha ⁻¹)		
	Fondo	Cobertera 1	Cobertera 2
1: 150+0+0	150	0	0
2: 75+75+0	75	75	0
3: 75+37,5+37,5	75	37,5	37,5

VI.2.3. Prácticas culturales.

- Material vegetal

En todos los ensayos se utilizó la variedad Guadamar, por ser la variedad más extendida en el Valle Medio del Ebro y por haber dado un rendimiento aceptable en el ensayo de variedades (Capítulo IV). Al ser de ciclo corto, se adapta adecuadamente al riego por aspersión en las condiciones climatológicas de la zona (Martínez Gómez, 2002).

- Siembra y cosecha

La primera campaña de ensayos se sembró el 17 de mayo y se cosechó el 4 de noviembre de 2002, la segunda se sembró el 28 de abril y se cosechó el 29 de septiembre de 2003 y la tercera y última se sembró el 27 de abril y se cosechó el 7 de octubre de 2004, con las mismas prácticas agrarias para el buen establecimiento del cultivo.

En todas las campañas se utilizó laboreo convencional y la dosis de siembra fue de 230 kg ha⁻¹, siembra realizada con una sembradora convencional de cereales en líneas separadas a 13 cm y una profundidad de siembra de 3-5 cm.

La cosecha se realizó en dos partes. En primer lugar, se recolectó a mano la biomasa aérea en 1 m² de superficie en el centro de cada parcela, utilizándose dichas plantas para determinar los componentes del rendimiento. El resto de la parcela se cosechó el día siguiente utilizando una cosechadora de ensayos Hege 125 B (Hans-Ulrich Hege, Waldenburg, Alemania), con una anchura de corte de 1,25 m.

- Tratamientos herbicidas y pesticidas

El control de malas hierbas se realizó mediante escarda manual y química.

En la campaña 2002 se efectuó un primer tratamiento tras la siembra con oxadiazón 25% (Ronstar, Aventis) a 2 L ha⁻¹ y dos tratamientos en postemergencia con propanil 35% (Herbimur, Sarabia) a 3,5 L ha⁻¹, el primero en el estadio de arroz con 3-4 hojas, el 24 de junio de 2002, y el segundo, tres semanas después, el 15 de julio de 2002.

En la campaña 2003, el 28 de abril se realizó el mismo tratamiento en preemergencia que el año anterior y un solo tratamiento en postemergencia,

con el arroz en pleno ahijado con bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf) a dosis de 4 L ha⁻¹. En esta campaña fue necesario tratar con el pesticida fenitrotión 50% (1 L ha⁻¹) en dos ocasiones contra la oruga defoliadora *Mythimna (Pseudaletia) unipuncta* (Haworth) y una con deltametrín 2,5% (0,5 L ha⁻¹) + malathión 50% (1,25 L ha⁻¹) contra la langosta (*Doclostaurus maroccanus* (Thunberg)).

El tratamiento de preemergencia en 2004 se hizo el 27 de abril con clomazona 36% (Command CS, FMC Foret) a dosis de 0,36 kg ha⁻¹. El siguiente tratamiento en postemergencia precoz del arroz con bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf) a dosis de 2 L ha⁻¹ se realizó el 15 de junio y el tratamiento en postemergencia tardía con azimsulfurón 50% (Gulliver, DuPont) a dosis de 0,020 kg ha⁻¹ el 1 de julio.

- Riego

Después de la siembra se instalaron equipos móviles de aspersión con tuberías de polietileno en un marco de 15m x 18m. Los aspersores (RC130 de Riegos Costa) disponían de dos boquillas de 4,4 mm y 2,4 mm de diámetro y se colocaron a 1,5 m de altura sobre el suelo. Para el correcto establecimiento del cultivo fue necesario iniciar todas las campañas con riegos cortos y frecuentes que deshicieran el encostramiento superficial del suelo y favorecieran la nascencia del arroz. Posteriormente, se pasó a regar con una frecuencia de 2-3 riegos por semana. La cantidad de agua aplicada en los riegos se determinó con pluviómetros instalados en la parcela experimental.

El riego aplicado se calculó en función de la ET₀, considerando que el coeficiente de cultivo (Kc) fue 1,2 durante todo el cultivo. La ET₀ se calculó según el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) a partir de los datos meteorológicos registrados en una estación meteorológica automática situada a 1 km y descrita en el Capítulo III.

En 2002 el primer riego se dio el 29 de mayo y el último el 20 de septiembre, con un total de 52 riegos y una dosis estacional de 722 mm. La pluviometría media en 2002 fue de 5,0 L m⁻² h⁻¹. En 2003, el primer riego se dio el 2 de mayo y el último el 18 de septiembre con un total de 72 riegos y una dosis estacional de 750 mm. La pluviometría media en 2003 fue de 5,7 L m⁻² h⁻¹. En 2004 el primer riego se dio el 7 de mayo y el último el 27 de septiembre, con un total de 83 riegos y una dosis estacional de 885 mm. La pluviometría media en 2004 fue de 5,4 L m⁻² h⁻¹. Las ligeras diferencias observadas en los valores de la pluviometría media fueron debidas a la variación de la presión de funcionamiento en los equipos de aspersión en las distintas campañas.

VI.2.4. Medidas experimentales.

Contenido de N inorgánico en el suelo: Antes de la siembra y después de la cosecha se hizo un muestreo de suelo hasta 90 cm de profundidad para determinar el contenido en NO₃-N en todo el perfil y NH₄-N en el caso del perfil

0-30 cm en 2002 y en el perfil 0-90 cm en 2003 y 2004. Antes de la siembra se hizo un muestreo por bloque y tras la cosecha uno por parcela experimental y bloque.

A lo largo del ciclo del arroz se han realizado las siguientes observaciones, medidas y muestreos:

Rendimiento: El grano obtenido de cada parcela (suma del procedente de la muestra de 1 m² segada a mano más el resto de la parcela cosechado a máquina) se pesó y se transformó en kg ha⁻¹, obteniendo así el rendimiento. Tras la determinación de la humedad del grano, el rendimiento de todas las parcelas se transformó a humedad uniforme del 14%.

Componentes del rendimiento: El *índice de cosecha* se determinó en el muestreo manual realizado para determinar la biomasa en el momento de la recolección. En dicho muestreo se contó el número de panículas obteniendo la *densidad de panículas por m²*. Del grano recolectado con la cosechadora se tomó una submuestra en la cual se contaron mil granos utilizando un contador de granos NUMIGRAL (Tripette et Renaud, París, Francia), que se pesaron para obtener el *Peso de mil granos* (PMG) y de otra submuestra se obtuvo el *Peso por hectolitro* (PHL) mediante el medidor de humedad y peso por hectolitro AQUASEARCH 600 (Kett Electric Laboratory, Tokio, Japón).

Nutrientes en planta: Se tomaron muestras al azar de 40 hojas enteras para analizar su contenido en N y P, así como en K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, y Zn. Las hojas se tomaron en inicio de ahijado (última hoja), pleno ahijado (última hoja) y floración (hoja bandera). Las hojas se secaron en estufa a 60 °C y posteriormente se molieron. Tras la cosecha se analizó el contenido en N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn del grano y de la paja. El N se analizó por combustión (Na 2100 Protein, CE Instruments, Wigan, UK). Para el análisis del resto de elementos minerales, las muestras fueron calcinadas según el método de la AOAC (Horwitz, 1980) y fueron analizadas mediante métodos aprobados por el Comité Inter-Institutos (CII, 1969). El P se analizó por colorimetría (Genesys 10vis, Thermo-Scientific, Madison, WI, USA). El resto de elementos se analizó por espectrofotometría de emisión (K y Na) y de absorción atómica (Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn) (UNICAM 969, Thermo-Scientific, Madison, WI, USA).

Asimismo, se determinó el *porcentaje de radiación fotosintéticamente activa* (PAR) interceptada por el cultivo en floración de la misma manera que en el ensayo de dosis de agua (Capítulo V).

Balance de N en el suelo: Entre las entradas se ha incluido el N inicial en el suelo (N_{S_INI}), el nitrógeno aportado por la fertilización (N_F) y la masa de N en el agua de riego (N_R). Entre las salidas se ha incluido la extracción de N por el cultivo (N_C) y el N final en el suelo (N_{S_FIN}). El N no computado incluye las pérdidas por lavado, inmovilización de N y pérdidas gaseosas y se ha calculado como la diferencia entre las entradas y salidas de N en el suelo.

VI.2.5. Análisis estadístico.

El efecto de la dosis de N y P sobre el rendimiento, sus componentes y el contenido en nutrientes de las plantas de arroz se analizó mediante análisis de regresión "stepwise", procedimiento que selecciona aquellas variables independientes que deben estar en el modelo y que resultan significativas ($p < 0,05$); se han utilizado las variables dosis de nitrógeno (N), dosis de fósforo (P), N^2 , P^2 y sus interacciones $N*P$ y N^2*P^2 . El efecto de la dosis de N en el contenido en nitrato y amonio en suelo se analizó mediante análisis de varianza y las medias se separaron con el test LSD al nivel de $\alpha = 0,05$. El efecto del fraccionamiento del N se analizó mediante análisis de varianza y las medias se separaron con el test LSD al nivel de $\alpha = 0,05$. El programa empleado fue STATGRAPHICS Plus 5.0.

VI.3. RESULTADOS.

VI.3.1. Ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica

VI.3.1.1. Rendimiento y crecimiento del arroz

En el año 2002 los rendimientos en grano (14% de humedad) fueron bajos, debido a la meteorología adversa (verano fresco) junto con una siembra tardía. Sin embargo, los rendimientos obtenidos en 2003 y 2004 pueden considerarse como aceptables (Tabla VI.4 y Figura VI.2).

Tabla VI.4. Valores medios del rendimiento, biomasa e índice de cosecha del arroz con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)			Biomasa (t ha ⁻¹)			IC		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
N (50)	-	5,03	4,38	-	11,76	7,53	-	0,36	0,49
N (100)	3,01	5,45	5,73	6,53	12,76	11,48	0,42	0,36	0,48
N (150)	3,22	5,75	6,82	7,51	13,39	12,86	0,39	0,36	0,48
N (200)	3,06	6,49	7,11	7,21	15,07	13,47	0,39	0,37	0,48
N (250)	2,85	-	-	7,25	-	-	0,36	-	-
P (0)	3,04	4,93	6,12	6,74	11,35	11,36	0,41	0,37	0,48
P (75)	3,26	5,36	6,19	7,49	12,28	11,96	0,40	0,36	0,49
P (150)	2,81	6,75	5,72	7,14	16,10	10,68	0,36	0,36	0,48

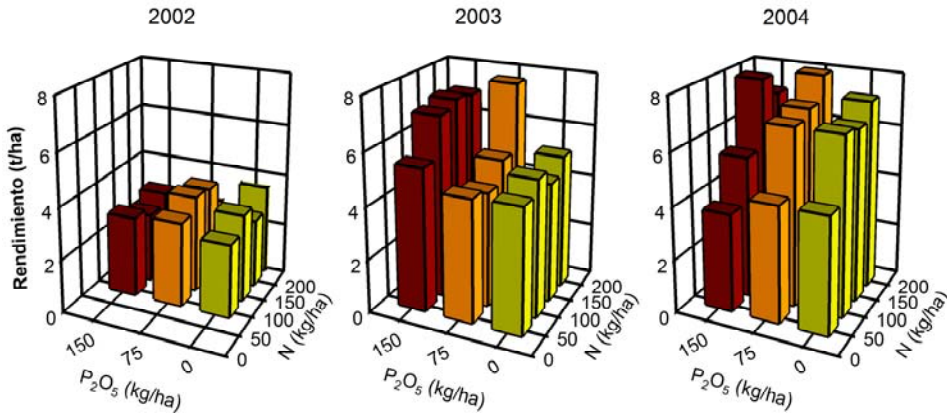


Figura VI.2. Efecto de la dosis de N y P en el rendimiento del arroz en los años 2002, 2003 y 2004.

En el año 2002 no se observó efecto del N ni del P sobre el rendimiento del arroz, probablemente debido a los bajos rendimientos obtenidos (Tabla VI.5, Figura VI.2). Sin embargo, en 2003 se observó un aumento del rendimiento al aumentar la dosis de N y de P (Tabla VI.5, Figura VI.2). En el año 2004 también se observó un aumento del rendimiento con las dosis crecientes de N pero no se observó efecto de la dosis de P (Tabla VI.5, Figura VI.2).

Tabla VI.5. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P en el rendimiento, la biomasa aérea y el índice de cosecha en los años 2002, 2003 y 2004.

Parámetros productivos	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$4.763 + 0,10 \cdot N \cdot P$	0,20	*
	2004	$3.690 + 18,56 \cdot N$	0,53	***
Biomasa (kg ha ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$10.916 + 0,26 \cdot N \cdot P$	0,22	*
	2004	$6.538 + 38,38 \cdot N$	0,38	***
Índice de Cosecha	2002	$0,42 - 0,0000023 \cdot N \cdot P$	0,18	*
	2003	NS		
	2004	NS		

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

Los resultados de la producción de biomasa aérea fueron similares a los obtenidos con el rendimiento en grano. Así, la biomasa tampoco se vio afectada por las dosis de N y P en 2002 (Tabla VI.5, Figura VI.3). Sin embargo, en el año 2003 se observó un aumento de la producción de biomasa con el aumento de la dosis de N y de P (Tabla VI.5, Figura VI.3). En el año 2004 se observó un aumento de la biomasa con el aumento de la dosis de N aplicada (Tabla VI.5, Figura VI.3).

El índice de cosecha no se vio alterado por la fertilización nitrogenada ni fosfórica en los años 2003 y 2004 (Tabla VI.5). Sin embargo, en el año 2002, en el que se observaron rendimientos bajos, el índice de cosecha disminuyó ligeramente conforme aumentó la dosis de N y P (Tabla VI.5). Hay que destacar que en el año 2004 se obtuvieron los mayores valores del índice de cosecha en todos los tratamientos de fertilización (Tabla VI.4).

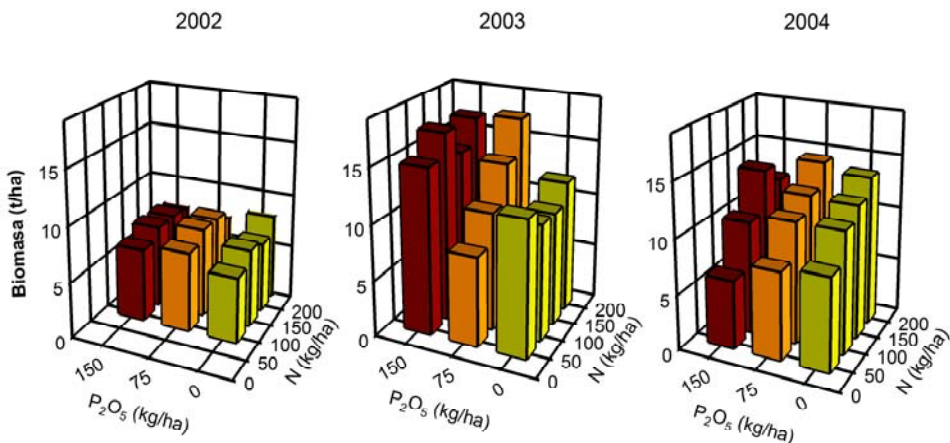


Figura VI.3. Efecto de la dosis de N y P en la biomasa del arroz en los años 2002, 2003 y 2004.

La Tabla VI.6 presenta los resultados de densidad de panículas, PHL y PMG. En general, la densidad de panículas fue algo mayor en 2004 que en 2003, con un rango de valores comprendido entre 510 y 856 panículas m^{-2} . En el año 2002 no se determinó esta variable. No obstante, la densidad de panículas estos dos años (2003 y 2004) fue superior a los valores obtenidos en esta variedad en los ensayos de variedades y fuente lineal en los años 2001 y 2002, ensayos en los que se determinó dicha variable. El PHL apenas varió en los años 2003 y 2004 con valores comprendidos entre 57,7 y 59,8 $kg\ hL^{-1}$ pero fue superior a los obtenidos en el año 2002, con un rango comprendido entre 50,4 y 51,6 $kg\ hL^{-1}$, año de cosecha muy baja. El PMG tuvo un comportamiento similar al del PHL.

Tabla VI.6. Valores medios de la densidad de panículas, PHL y PMG con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	Panículas (n° m ⁻²)			PHL (kg hL ⁻¹)			PMG (g)		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
N (50)	-	585	643	-	59,8	59,5	-	24,0	24,1
N (100)	-	571	778	51,3	58,6	59,5	21,7	25,1	24,1
N (150)	-	597	856	51,6	57,9	58,6	21,4	23,7	23,7
N (200)	-	700	836	51,0	57,8	59,4	21,3	24,1	23,9
N (250)	-	-	-	50,4	-	-	21,1	-	-
P (0)	-	510	765	51,6	57,7	59,5	21,6	23,8	24,1
P (75)	-	563	809	50,7	58,6	58,9	21,2	24,3	23,6
P (150)	-	805	760	51,0	58,9	59,3	21,3	24,8	24,2

No se encontraron relaciones significativas entre el PMG y el PHL con las dosis de fertilizantes aplicadas en ninguno de los años de estudio (Tabla VI.7). Los valores medios del PHL y del PMG han sido inferiores en 2002, año de rendimientos en grano también inferiores, lo cual concuerda con la relación confirmada en el ensayo de variedades entre rendimiento y PMG. Sin embargo, la densidad de panículas aumentó en 2003 al aumentar el N y P aplicado y aumentó en 2004 al aumentar el N aplicado, no observándose efecto del N ni del P aplicado en 2002.

Tabla VI.7. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P en los componentes del rendimiento: densidad de panículas, PMG y PHL en los años 2002, 2003 y 2004.

Parámetros productivos	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
Densidad de panículas (n° m ²)	2002	-		
	2003	486+ 0,015·N·P	0,29	**
	2004	614 + 1,31·N	0,18	**
PMG (g)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
PHL (kg hL ⁻¹)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

VI.3.1.2. Radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR)

Al observar los resultados de la IPAR por el arroz en la fase de floración en los distintos tratamientos de N, se observa una tendencia a aumentar la IPAR al aumentar la dosis de N en los tres años de estudio pero esta relación es menos clara en el 2002 (Figura VI.4, Tabla VI.8).

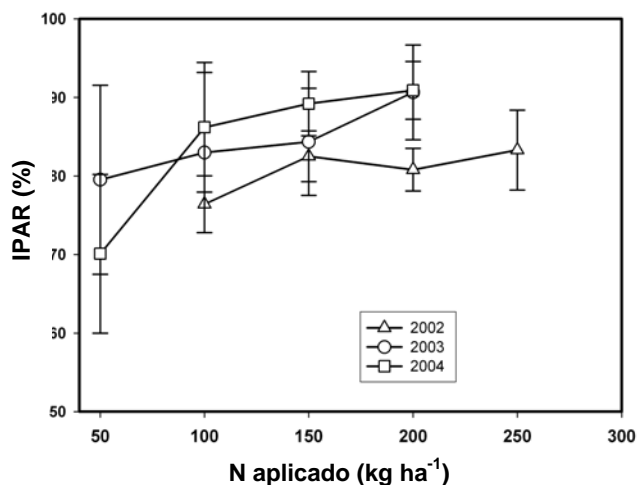


Figura VI.4. Relación entre el N aplicado y la radiación fotosintéticamente activa interceptada en la fase de floración del arroz en los años 2002, 2003 y 2004. Las barras verticales representan la desviación estándar.

En el año 2002 el análisis de regresión mostró que la IPAR no se vio afectado por las dosis de N y P aplicadas (Tabla VI.9). En el año 2003 la IPAR aumentó al aumentar la dosis de N y P. En el año 2004 la IPAR se vio afectado únicamente por la dosis de N y se encontró una relación cuadrática ($R^2=0,59$) (Tablas VI.8 y VI.9).

Tabla VI.8. Valores medios de la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el arroz en floración con las distintas dosis de nitrógeno y fósforo aplicadas.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	IPAR (%)		
	2002	2003	2004
N (50)	-	79,5	70,1
N (100)	76,4	83,0	86,2
N (150)	82,5	84,3	89,2
N (200)	80,8	90,7	90,9
N (250)	83,3	-	-
P (0)	80,6	81,5	83,2
P (75)	81,2	83,4	86,7
P (150)	80,4	89,6	82,4

Tabla VI.9. Análisis de regresión del efecto de la dosis de N y P (kg ha⁻¹) en la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR, %).

Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
2002	NS		
2003	$80,44 + 0,00047 \cdot N \cdot P$	0,20	*
2004	$49,84 + 0,49 \cdot N - 0,0014 \cdot N^2$	0,59	N: ***; N ² : **

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

La Figura VI.5 muestra que en los años 2003 y 2004 existió una clara relación lineal significativa ($p < 0,001$) entre la IPAR y el rendimiento ($R^2 = 0,89$) (Figura VI.5), de tal manera que al aumentar la radiación interceptada por el cultivo aumentó el rendimiento. Las observaciones del año 2002, dado el bajo rendimiento en grano, se separan de la tendencia general de la recta de regresión.

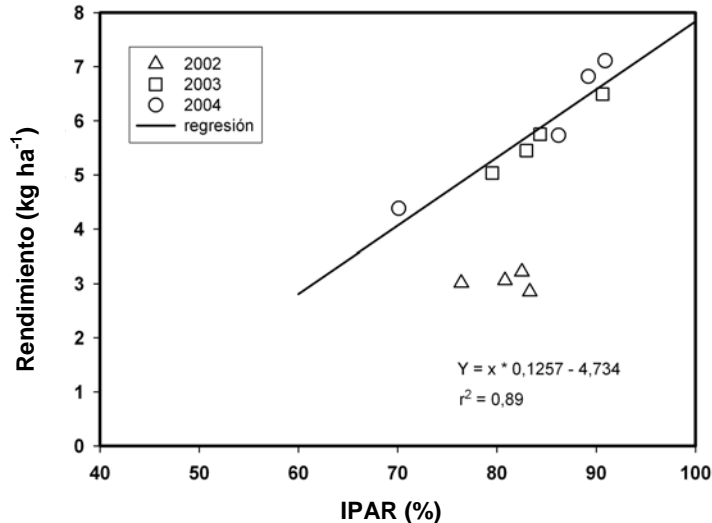


Figura VI.5. Relación entre el rendimiento en grano para las distintas dosis de N en los años 2003 y 2004 y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el arroz. Los datos de 2002 no se usaron para la regresión.

VI.3.1.3. Contenido en nutrientes

- Contenido en hoja

El contenido de N en las hojas de arroz estuvo siempre por encima del umbral de deficiencia establecido por Dobermann y Fairhurst (2000) (Tablas VI.10 a VI.12). El contenido de N en hoja en el estadio de inicio de ahijado sólo se vio afectado significativamente por las dosis de N y de P aplicadas en el año 2004, en el que se observó un aumento del contenido de N al aumentar la dosis de N y una ligera disminución al aumentar la dosis de P (Tabla VI.13). Sin embargo, en pleno ahijado el contenido en N de las hojas aumentó con la dosis de N en dos de los años del estudio. En floración el contenido en N de la hoja aumentó al aumentar la dosis de nitrógeno aplicado en todos los años y además, la aplicación de P en 2003 también aumentó el contenido en N de las hojas del arroz.

Tabla VI.10. Valores óptimos y de deficiencia del contenido en nutrientes de arroz (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Tejido y nivel	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	%					mg kg ⁻¹			
<i>Hoja en pleno ahijado</i>									
Ópt.	2,9-4,2	0,20-0,40	1,8-2,6	0,2-0,6	0,15-0,30	75-150	40-700	7-15	25-50
Def.	<2,5	<0,10	<1,5	<0,15	<0,12	<70	<40	<5	<20
<i>Hoja en floración</i>									
Ópt.	2,2-2,5	0,20-0,30	1,4-2,0						
Def.	<2,0	<0,18	<1,2						
<i>Paja en cosecha</i>									
Ópt.	0,6-0,8	0,10-0,15	1,5-2,0	0,3-0,5	0,20-0,30				
Def.			<1,2	<0,15	<0,10			<6	
<i>Grano en cosecha</i>									
Ópt.	0,9-1,2	0,18-0,26	0,2-0,3						

Ópt.: Rango óptimo. Def.: Deficiencia

Tabla VI.11. Valores medios del contenido en nutrientes de hojas en distintos momentos fenológicos en el ensayo de fertilización en 2002.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	(%)					mg kg ⁻¹			
<i>Inicio ahijado</i>									
N (100)	3,74	0,20	2,11	0,47	0,208	175	29,0	7,00	20,7
N (150)	3,81	0,19	2,18	0,54	0,225	219	30,9	8,12	17,4
N (200)	3,81	0,21	2,15	0,47	0,213	190	30,2	8,78	25,5
N (250)	3,86	0,20	2,21	0,50	0,221	170	30,3	9,06	19,8
P (0)	3,83	0,19	2,08	0,44	0,205	176	30,7	9,14	17,5
P (75)	3,82	0,22	2,21	0,52	0,224	196	29,5	7,73	17,8
P (150)	3,77	0,20	2,20	0,53	0,223	193	30,2	7,85	27,2
<i>Pleno ahijado</i>									
N (100)	3,26	0,165	1,56	0,493	0,167	98	32,7	6,16	33,4
N (150)	3,51	0,173	1,58	0,531	0,181	105	31,8	7,51	18,0
N (200)	3,45	0,164	1,59	0,505	0,171	113	33,9	6,92	17,0
N (250)	3,64	0,175	1,60	0,538	0,190	102	35,0	7,88	17,6
P (0)	3,49	0,165	1,53	0,491	0,167	105	35,0	7,07	18,4
P (75)	3,50	0,176	1,64	0,519	0,181	105	33,0	7,43	22,7
P (150)	3,41	0,167	1,58	0,540	0,185	102	32,0	6,86	23,4
<i>Floración</i>									
N (100)	2,67	0,164	1,14	0,460	0,074	62	46,0	5,29	10,5
N (150)	2,97	0,175	1,19	0,508	0,084	65	38,2	6,63	11,5
N (200)	2,98	0,166	1,18	0,499	0,080	66	43,8	6,78	11,0
N (250)	3,15	0,168	1,22	0,506	0,087	66	43,4	7,24	11,4
P (0)	2,90	0,163	1,14	0,480	0,079	64	49,2	7,03	10,9
P (75)	3,02	0,174	1,21	0,501	0,084	68	36,2	6,50	10,8
P (150)	2,91	0,167	1,20	0,500	0,081	63	43,1	5,93	11,6

Tabla VI.12. Valores medios del contenido en nutrientes de hojas en distintos momentos fenológicos en los ensayos de fertilización en 2003 y 2004.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	%					mg kg ⁻¹			
<i>2003</i>									
<i>Inicio ahijado</i>									
N (50)	4,19	0,208	2,06	0,477	0,274	155	59,4	10,09	22,0
N (100)	4,18	0,210	2,17	0,432	0,272	81	56,2	7,92	21,3
N (150)	4,44	0,217	2,09	0,440	0,271	95	58,8	9,13	23,3
N (200)	4,48	0,211	2,04	0,472	0,279	108	61,7	8,88	22,7
P (0)	4,33	0,207	2,12	0,426	0,265	131	57,0	9,57	22,6
P (75)	4,28	0,212	2,06	0,459	0,267	94	61,1	8,87	21,7
P (150)	4,36	0,216	2,09	0,482	0,279	104	58,9	8,58	22,7
<i>Pleno ahijado</i>									
N (50)	3,24	0,185	1,71	0,368	0,078	67	29,7	3,46	13,3
N (100)	3,44	0,186	1,85	0,398	0,089	64	31,1	4,28	13,9
N (150)	3,60	0,195	1,88	0,388	0,096	62	28,3	4,24	15,8
N (200)	3,81	0,199	1,81	0,374	0,093	63	29,0	5,40	15,9
P (0)	3,51	0,184	1,81	0,389	0,088	70	33,4	4,45	14,4
P (75)	3,39	0,193	1,77	0,353	0,088	58	26,9	4,00	14,4
P (150)	3,67	0,197	1,85	0,405	0,092	64	28,3	4,59	15,4
<i>Floración</i>									
N (50)	2,99	0,200	1,16	0,443	0,100	69	39,6	7,50	9,0
N (100)	3,43	0,200	1,17	0,453	0,108	68	48,0	8,04	10,5
N (150)	3,67	0,205	1,21	0,474	0,119	79	35,1	7,44	11,2
N (200)	3,68	0,209	1,21	0,479	0,110	75	39,1	7,10	11,4
P (0)	3,31	0,197	1,17	0,447	0,105	71	49,8	7,30	10,0
P (75)	3,41	0,205	1,18	0,461	0,113	75	39,7	7,87	10,4
P (150)	3,61	0,209	1,22	0,478	0,110	73	31,8	7,38	11,1
<i>2004</i>									
<i>Inicio ahijado</i>									
N (50)	4,15	0,244	2,27	0,479	0,256	118	46,0	5,43	24,8
N (100)	4,48	0,247	2,27	0,460	0,280	116	44,8	5,83	26,1
N (150)	4,59	0,252	2,27	0,494	0,273	110	48,0	6,71	26,5
N (200)	4,78	0,252	2,33	0,479	0,283	114	44,9	6,18	26,8
P (0)	4,68	0,246	2,26	0,446	0,268	123	48,8	5,88	27,7
P (75)	4,44	0,253	2,35	0,500	0,279	116	46,6	6,27	26,3
P (150)	4,38	0,247	2,25	0,488	0,272	105	42,4	5,96	24,2
<i>Floración</i>									
N (50)	2,30	0,218	1,11	0,664	0,065	81	95,0	8,80	12,0
N (100)	2,55	0,197	1,27	0,567	0,065	71	56,9	6,91	7,8
N (150)	2,73	0,210	1,34	0,538	0,073	80	44,5	6,54	10,0
N (200)	2,86	0,196	1,30	0,538	0,070	86	39,4	5,26	8,7
P (0)	2,56	0,202	1,23	0,578	0,067	77	74,3	7,04	12,3
P (75)	2,68	0,202	1,29	0,574	0,068	80	50,1	7,34	8,4
P (150)	2,61	0,212	1,25	0,578	0,070	82	52,5	6,26	8,2

Tabla VI.13. Relación entre el contenido de N (%) en hoja de arroz en distintos momentos fenológicos y la dosis de N y de P (kg ha⁻¹) en 2002, 2003 y 2004.

	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
<i>Inicio del ahijado</i>			
2002	NS		
2003	NS		
2004	$4 + 0,0051 \cdot N - 0,000015 \cdot N \cdot P$	0,35	N: ***; NxP: *
<i>Pleno ahijado</i>			
2002	$3,09 + 0,0021 \cdot N$	0,28	**
2003	$3,10 + 0,0034 \cdot N$	0,20	*
2004	-		
<i>Floración</i>			
2002	$2,43 + 0,00296 \cdot N$	0,26	**
2003	$3,29 + 0,000022 \cdot N \cdot P$	0,25	**
2004	$2,15 + 0,0037 \cdot N$	0,46	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

El contenido de P en las hojas de arroz estuvo siempre por encima del umbral de deficiencia (<0,18%) establecido por Dobermann y Fairhurst (2000) excepto en floración en 2002, que se observó deficiencia en todos los tratamientos (Tablas VI.11 y VI.12). Solamente en el año 2003 se observó un aumento significativo del contenido en P de las hojas al aumentar el P y el N aplicado (Tabla VI.14).

Tabla VI.14. Relación entre el contenido de P (%) en hoja de arroz en distintos momentos fenológicos y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
<i>Inicio de ahijado</i>			
2002	NS		
2003	NS		
2004	NS		
<i>Pleno ahijado</i>			
2002	NS		
2003	$0,185 + 0,00000069 \cdot N \cdot P$	0,16	*
2004	-		
<i>Floración</i>			
2002	NS		
2003	$0,198 + 0,00000062 \cdot N \cdot P$	0,27	**
2004	NS		

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); NS: efecto no significativo.

En el estadio de inicio del ahijado, en el año 2002 se observó que el aumento de la dosis de P aplicada incrementó el contenido en Ca, Mg y Zn de las hojas (Tabla VI.15). Asimismo, el incremento de la dosis de N y P aumentó el contenido en K. En el año 2003 no se observó ningún efecto de las dosis de N y P aplicadas sobre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn. En el año 2004

el incremento de la dosis de P disminuyó el contenido en Fe y Zn. Este año el aumento de las dosis de N y P disminuyó el contenido en Mn.

Tabla VI.15. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz, en inicio de ahijado, y las dosis de N y de P (kg ha^{-1}) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

Nutrientes	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
K (%)	2002	$2,11 + 0,0000040 \cdot N \cdot P$	0,16	**
	2003	NS		
	2004	NS		
Ca (%)	2002	$0,454 + 0,000572 \cdot P$	0,09	*
	2003	NS		
	2004	NS		
Mg (%)	2002	$0,208 + 0,000121 \cdot P$	0,12	*
	2003	NS		
	2004	NS		
Fe (mg kg^{-1})	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	$123,5 - 0,1194 \cdot P$	0,17	**
Mn (mg kg^{-1})	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	$48,76 - 0,000302 \cdot N \cdot P$	0,13	*
Cu (mg kg^{-1})	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Zn (mg kg^{-1})	2002	$16,55 + 0,00046 \cdot P^2$	0,13	*
	2003	NS		
	2004	$27,79 - 0,0233 \cdot P$	0,28	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

Según los umbrales indicados por Dobermann y Fairhurst (2000) (Tabla VI.10), en el estadio de pleno ahijado se observó deficiencia de Mn en 2002, y de Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en 2003 (Tablas VI.11 y VI.12). No se observó efecto de la dosis de N y P aplicados sobre el contenido de K, Ca y Fe en los dos años en que se estudió (2002 y 2003). En 2002, el aumento de la dosis de N incrementó el contenido en Cu de las hojas y el incremento de la dosis de N y P aumentó el contenido en Mg (Tabla VI.16). En 2003, el incremento de la dosis de N aumentó el contenido en Mg y Zn de las hojas. Sin embargo, el aumento de las dosis de N y P disminuyó el contenido en Mn.

En el estadio de floración se observó deficiencia de K en 2003 con dosis bajas de N ($\leq 100 \text{ kg ha}^{-1}$) y de P ($\leq 75 \text{ kg ha}^{-1}$) y deficiencia de Mg y Zn en 2004 (Tablas VI.11 y VI.12). No se observó efecto de la dosis N y P aplicados sobre el contenido de Mg y Fe de la hoja bandera en ninguno de los años (Tabla VI.17). En 2002, solamente el contenido en Cu de la hoja bandera se vio afectado por el N y P aplicados, aumentando al incrementar la dosis de N, pero disminuyendo ligeramente al aumentar la dosis de P. En 2003, al incrementar

simultáneamente las dosis de N y P, aumentó el contenido en Ca y Zn de la hoja bandera, pero disminuyó el contenido en Mn. En 2004, el contenido en K aumentó al incrementar la dosis de N hasta los 160 kg N ha⁻¹, disminuyendo para dosis mayores. Este año el contenido en Mn y Cu disminuyeron al incrementar la dosis de N aplicada.

Tabla VI.16. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz en pleno ahijado y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002 y 2003.

Nutrientes	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
K (%)	2002	NS		
	2003	NS		
Ca (%)	2002	NS		
	2003	NS		
Mg (%)	2002	0,167 + 0,00000075·N·P	0,16	**
	2003	0,078 + 0,000089·N	0,11	*
Fe (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	NS		
Mn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	31,72 - 0,000301·N·P	0,11	*
Cu (mg kg ⁻¹)	2002	5,53 + 0,0091·N	0,12	*
	2003	NS		
Zn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	13,52 + 0,000058·N ²	0,11	*

Nivel de significación: *: (p<0,05); **: (p<0,01); NS: efecto no significativo.

Tabla VI.17. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en hojas de arroz en floración y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

Nutrientes	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
K (%)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	$0,853 + 0,0061 \cdot N - 0,000019 \cdot N^2$	0,45	N: ***; N ² : **
Ca (%)	2002	NS		
	2003	$0,44 + 0,00000204 \cdot N \cdot P$	0,18	*
	2004	$0,678 - 0,000812 \cdot N$	0,25	**
Mg (%)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Fe (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Mn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$47,47 - 0,000854 \cdot N \cdot P$	0,19	*
	2004	$103,7 - 0,358 \cdot N$	0,33	***
Cu (mg kg ⁻¹)	2002	$4,39 + 0,0154 \cdot N - 0,000045 \cdot N \cdot P$	0,31	N: ***; N·P: *
	2003	NS		
	2004	$9,62 - 0,0219 \cdot N$	0,24	**
Zn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$9,76 + 0,000089 \cdot N \cdot P$	0,20	*
	2004	NS		

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

- Contenido en el grano y en la paja en cosecha

El contenido en N del grano estuvo dentro del rango óptimo (Tablas VI.10 y VI.18) y sólo se vio afectado por la fertilización nitrogenada en 2004, año en que se observó un aumento conforme aumentó la dosis de N aplicada (Tabla VI.19). El contenido en P del grano también estuvo dentro del rango óptimo y aumentó al aumentar la dosis de P aplicada en 2002 y 2003 (Tabla VI.18). Sin embargo, el aumento de la dosis de N dio lugar a una disminución del contenido en P del grano en 2002 y 2003.

El contenido en N de la paja estuvo dentro del rango óptimo excepto en 2004 (Tablas VI.10, VI.18 y VI.19). El contenido en N de la paja aumentó con la dosis de N aplicada sólo en 2002. El contenido en P de la paja estuvo por debajo del rango óptimo en 2002 y 2004 salvo con la dosis más alta de P. En 2003 el contenido en P de la paja estuvo por debajo del rango óptimo a dosis altas de N y P, probablemente debido a un efecto dilución debido al aumento de la producción de biomasa. El contenido en P de la paja disminuyó al aumentar la dosis de N aplicada en 2004, pero aumentó al aumentar las dosis de N y P aplicadas en 2002.

Tabla VI. 18. Valores medios del contenido en nutrientes del grano y de la paja en los ensayos de fertilización en 2002, 2003 y 2004.

Tratamiento (kg ha ⁻¹)	Grano										Paja								
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	%					mg kg ⁻¹					%					mg kg ⁻¹			
<i>2002</i>																			
N (100)	1,28	0,236	0,367	0,073	0,108	37	17,0	5,06	10,5		0,61	0,055	1,44	0,55	0,138	164	46,6	3,88	15,5
N (150)	1,35	0,219	0,361	0,068	0,100	29	13,9	5,20	11,5		0,71	0,058	1,41	0,50	0,141	169	40,3	3,94	17,9
N (200)	1,36	0,199	0,341	0,064	0,091	29	15,8	5,27	11,0		0,74	0,056	1,37	0,51	0,140	161	49,1	4,34	17,6
N (250)	1,35	0,207	0,338	0,062	0,092	35	14,2	5,38	11,4		0,76	0,062	1,35	0,49	0,136	172	49,0	4,85	16,3
P (0)	1,31	0,207	0,339	0,065	0,095	31	18,0	5,52	10,9		0,67	0,052	1,41	0,52	0,135	188	58,7	4,20	17,0
P (75)	1,35	0,209	0,346	0,064	0,093	32	12,9	5,01	10,8		0,73	0,059	1,41	0,53	0,140	166	40,0	4,40	18,1
P (150)	1,35	0,230	0,371	0,072	0,105	35	14,7	5,16	11,6		0,71	0,062	1,36	0,48	0,140	146	40,0	4,16	15,4
<i>2003</i>																			
N (50)	1,27	0,248	0,209	0,054	0,105	85	21,6	3,84	20,8		0,55	0,070	1,39	0,43	0,180	61	31,6	5,62	7,7
N (100)	1,33	0,232	0,194	0,057	0,099	72	18,2	4,15	20,2		0,61	0,062	1,56	0,46	0,196	61	30,3	5,94	8,6
N (150)	1,34	0,244	0,205	0,058	0,103	63	12,7	4,27	20,2		0,67	0,060	1,68	0,44	0,209	68	21,9	4,92	10,4
N (200)	1,32	0,245	0,199	0,047	0,101	69	17,5	5,32	20,3		0,68	0,053	1,69	0,49	0,193	88	28,8	6,27	10,3
P (0)	1,32	0,255	0,214	0,057	0,108	78	21,7	4,67	21,8		0,61	0,067	1,45	0,45	0,190	70	32,0	5,98	9,6
P (75)	1,31	0,248	0,198	0,053	0,101	77	18,7	4,33	20,4		0,64	0,064	1,56	0,44	0,200	63	27,6	5,89	8,9
P (150)	1,32	0,224	0,193	0,052	0,097	62	12,1	4,18	18,9		0,64	0,053	1,71	0,47	0,193	76	25,0	5,20	9,3
<i>2004</i>																			
N (50)	1,08	0,304	0,218	0,078	0,110	105	32,5	5,05	21,5		0,45	0,079	1,55	0,61	0,174	99	51,2	2,90	11,4
N (100)	1,05	0,282	0,229	0,07	0,104	99	21,7	5,50	19,3		0,44	0,052	1,72	0,64	0,179	94	35,2	3,29	10,7
N (150)	1,11	0,275	0,223	0,072	0,103	111	15,1	5,17	18,5		0,47	0,041	1,79	0,68	0,188	97	30,5	3,05	10,8
N (200)	1,17	0,247	0,222	0,066	0,100	75	14,8	4,97	17,8		0,43	0,037	1,87	0,63	0,192	97	33,2	3,40	10,4
P (0)	1,09	0,277	0,212	0,065	0,101	99	23,8	5,46	19,3		0,43	0,046	1,71	0,63	0,176	94	46,9	3,21	10,7
P (75)	1,12	0,275	0,229	0,077	0,104	98	18,7	5,03	19,2		0,46	0,052	1,78	0,64	0,187	93	30,3	3,18	11,0
P (150)	1,09	0,279	0,228	0,073	0,108	94	20,5	5,03	19,4		0,46	0,059	1,71	0,65	0,187	104	35,4	3,08	10,7

Tabla VI.19. Relación entre el contenido de N y P (%) en el grano y la paja de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
<i>N en grano (%)</i>			
2002	NS		
2003	NS		
2004	$1,05 + 0,000028 \cdot N^2$	0,20	**
<i>N en paja (%)</i>			
2002	$0,539 + 0,00095 \cdot N$	0,11	*
2003	NS		
2004	NS		
<i>P en grano (%)</i>			
2002	$0,243 - 0,000216 \cdot N + 0,00000011 \cdot P^2$	0,29	N: **; P ² : *
2003	$0,255 - 0,0000014 \cdot P^2$	0,25	**
2004	NS		
<i>P en paja (%)</i>			
2002	$0,053 + 0,00000034 \cdot N \cdot P$	0,10	*
2003	NS		
2004	$0,087 - 0,000278 \cdot N$	0,42	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

El contenido en K del grano sólo se vio afectado por la fertilización aplicada en 2002, aumentando al aumentar la dosis de P aplicada y disminuyendo al aumentar la dosis de N aplicada (Tabla VI.20). El contenido en Ca del grano no se vio afectado por la fertilización con N y P. El contenido en Mg del grano disminuyó en 2002 y 2004 al aumentar la dosis de N aplicada, pero aumentó al aumentar la dosis de P aplicada. El contenido en Fe del grano solo se vio afectado en uno de los años (2003), disminuyendo conforme aumentó las dosis de N y P aplicadas. El contenido en Mn del grano disminuyó en 2003 al aumentar las dosis de N y P aplicadas; en 2004 disminuyó al aumentar la dosis de N hasta 190 kg ha⁻¹. El contenido en Cu aumentó en 2003 al aumentar la dosis de N aplicada. El contenido en Zn del grano disminuyó en 2003 al aumentar la dosis de P aplicada y en 2004 al aumentar la dosis de N aplicada.

Tabla VI.20. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en el grano de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

Nutrientes	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
K (%)	2002	$0,376 - 0,00022 \cdot N + 0,000014 \cdot P^2$	0,25	N: *; P ² : **
	2003	NS		
	2004	NS		
Ca (%)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Mg (%)	2002	$0,113 - 0,00011 \cdot N + 0,00000049 \cdot P^2$	0,27	N: **; P ² : *
	2003	NS		
	2004	$0,112 - 0,000062 \cdot N$	0,09	*
Fe (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$80,37 - 0,00084 \cdot N \cdot P$	0,20	*
	2004	NS		
Mn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$21,67 - 0,00051 \cdot N \cdot P$	0,21	**
	2004	$49,03 - 0,382 \cdot N + 0,001 \cdot N^2$	0,45	N: **; N ² : *
Cu (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$3,53 + 0,000044 \cdot N^2$	0,22	**
	2004	NS		
Zn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	$21,67 - 0,0176 \cdot P$	0,15	*
	2004	$22,26 - 0,0237 \cdot N$	0,50	***

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

El contenido en Ca, Cu y Zn de la paja de arroz no se vio afectado por el N y P aplicados en ninguno de los años (Tabla VI.21). El contenido en K aumentó al incrementar la dosis de N en 2003 y 2004 y al incrementar también la dosis de P aplicada en 2003. El contenido en Mg aumentó en 2004 al incrementar las dosis aplicadas de N y P. El contenido en Fe de la paja aumentó al incrementar la dosis de N aplicada en 2003, pero disminuyó al incrementar la dosis de P aplicada en 2002. El contenido en Mn de la paja disminuyó en 2002 y 2004 al incrementar la dosis de N aplicada. Además, en 2004 el incremento de la dosis de P también disminuyó el contenido de Mn de la paja.

Tabla VI.21. Relación entre el contenido de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn en la paja de arroz en cosecha y las dosis de N y de P (kg ha⁻¹) aplicadas en 2002, 2003 y 2004.

Nutrientes	Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
K (%)	2002	NS		
	2003	1,43 + 0,000015·N·P	0,21	**
	2004	1,48 + 0,002·N	0,50	***
Ca (%)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Mg (%)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	0,176 + 0,00000081·N·P	0,09	*
Fe (mg kg ⁻¹)	2002	187,7 - 0,281·P	0,17	**
	2003	54,90 + 0,00074·N ²	0,27	**
	2004	NS		
Mn (mg kg ⁻¹)	2002	55,60 - 0,125·P	0,20	**
	2003	NS		
	2004	44,71 - 0,00077·N·P	0,10	*
Cu (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		
Zn (mg kg ⁻¹)	2002	NS		
	2003	NS		
	2004	NS		

Nivel de significación: *: ($p < 0,05$); **: ($p < 0,01$); ***: ($p < 0,001$); NS: efecto no significativo.

VI.3.1.4. Contenido de N inorgánico en el suelo

La forma mayoritaria del N inorgánico en el suelo ha sido NO₃⁻, siendo inapreciable en 2003 como NH₄⁺. Si bien la cantidad de nitrógeno inorgánico presente en el suelo antes de realizarse el abonado de fondo ha sido variable en los distintos años, los primeros 30 cm del suelo han tenido un mayor contenido que a mayor profundidad (Tabla VI.22). En el año 2003, los valores iniciales de N inorgánico fueron de prácticamente el doble que en 2004.

Tabla VI.22. Contenido de nitratos y amonio del suelo al inicio de los ensayos en las campañas de 2002, 2003 y 2004.

Perfil del suelo (cm)	NO ₃ -N y NH ₄ -N (kg ha ⁻¹)					
	2002		2003		2004	
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N
0-30	45,5	15,5	92,9	Ip	42,0	4,3
30-60	41,4	-	55,8	Ip	29,4	3,6
60-90	21,3	-	39,4	Ip	22,1	2,2
<i>Total 0-90</i>	<i>108,1</i>	<i>15,5</i>	<i>188,2</i>	<i>Ip</i>	<i>93,5</i>	<i>10,2</i>

Ip: Inapreciable

En cosecha se observó todos los años una disminución del contenido de N inorgánico en los primeros 30 cm del suelo, lugar en el que se concentra la

mayor parte de las raíces del arroz (Figura VI.6, Tablas VI.23 a VI.25). Sin embargo, en perfiles más profundos la tendencia (excepto en 2002) fue hacia un aumento del contenido en N inorgánico en cosecha. El suelo del tratamiento al que se aplicó la menor cantidad de N fue el que tuvo menor contenido en N en forma de nitrato y amonio. En el resto de tratamientos los niveles de N inorgánico en cosecha fueron mayores pero sin diferencias entre las distintas dosis considerado el perfil de 0-90 cm.

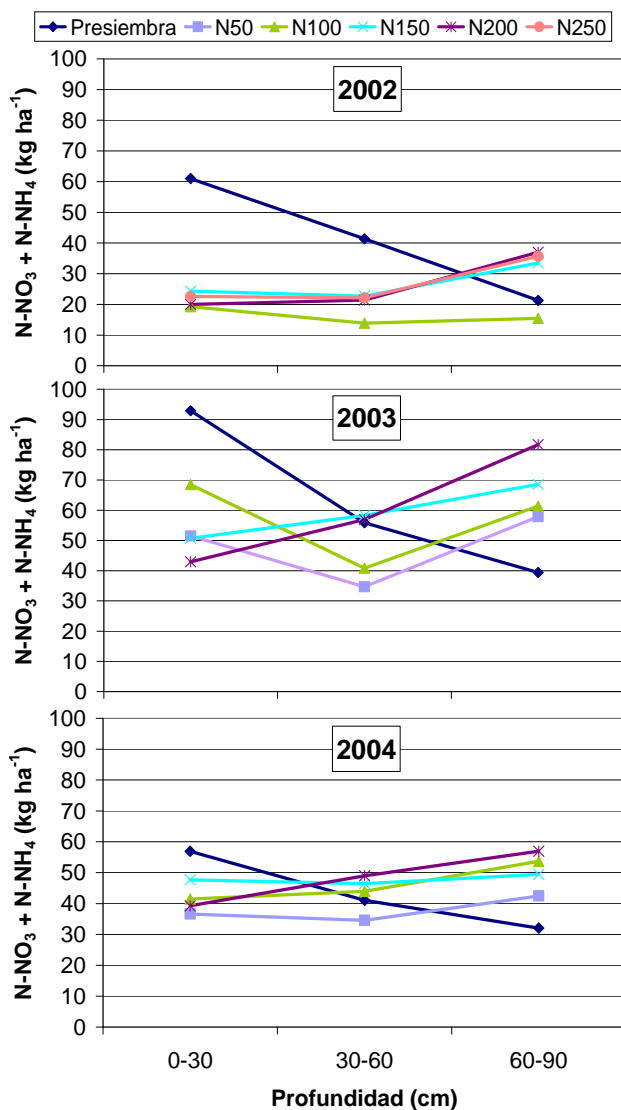


Figura VI.6. Contenido de nitrato y amonio del suelo a distintas profundidades en presiembra y al final del ensayo de fertilización (N y P) según las dosis de N (kg ha⁻¹) aplicadas en los años 2002, 2003 y 2004.

Tabla VI.23. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2002.

N aplicado (kg ha ⁻¹)	N-NO ₃ + N-NH ₄ (kg ha ⁻¹)			
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
100	19,2	13,9	15,5	48,6
150	24,3	22,7	33,5	80,5
200	20,0	21,4	37,0	78,4
250	22,6	22,1	35,8	80,5

Tabla VI.24. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2003.

N aplicado (kg ha ⁻¹)	N-NO ₃ + N-NH ₄ (kg ha ⁻¹)				
	0-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
50	21,8	29,7	34,7	57,9	144,1
100	31,0	37,5	40,8	61,4	170,7
150	21,3	29,5	58,3	68,6	177,6
200	19,6	23,4	56,9	81,7	181,6

Tabla VI.25. Contenido de nitrato y amonio del suelo en función del nitrógeno aplicado y de la profundidad del suelo en postcosecha del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica en la campaña de 2004.

N aplicado (kg ha ⁻¹)	N-NO ₃ + N-NH ₄ (kg ha ⁻¹)				
	0-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
50	19,0	17,7	34,6	42,5	113,7
100	21,1	20,4	44,0	53,7	139,2
150	22,5	25,2	46,5	49,4	143,6
200	18,0	21,3	49,0	57,0	145,2

En general, las entradas de N han superado las salidas, a excepción de los tratamientos de 50 y 100 kg ha⁻¹ en la campaña 2004 (Tabla VI.26). Esto indica que ha habido pérdidas de N. Las pérdidas fueron mucho mayores en el año 2002 probablemente debido a que el N no pudo ser aprovechado por el cultivo (bajas extracciones) dadas las condiciones meteorológicas adversas de ese año (Tabla VI.26). En el año 2003 las extracciones del cultivo aumentaron al aumentar la dosis de N aplicado pero en 2004 aumentaron hasta la dosis de 150 kg de N ha⁻¹. Las pérdidas de N aumentaron al aumentar la dosis de N aplicada. Considerando la excepcionalidad del año 2002, los datos del balance indican que las pérdidas fueron bajas cuando la dosis de N aplicado no superó los 100 kg N/ha.

Tabla VI.26. Balance de N en el suelo de 0 a 90 cm de profundidad en las 3 campañas en el ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica.

Año	Tratamiento	N (kg ha ⁻¹)						Balance	
		Entradas			Salidas				
		N _{S_INI}	N _F	N _R ‡	N _C	N _{S_FIN}			
2002	N (100)	123,7	100	13,5	57,0	48,6	131,6	±13,6	
	N (150)	123,7	150	13,5	71,5	80,6	135,1	±23,8	
	N (200)	123,7	200	13,5	70,3	78,4	188,5	±35,9	
	N (250)	123,7	250	13,5	68,7	80,4	238,1	±18,6	
2003	N (50)	188,1	50	8,8	94,8	144,1	8,0	±81,8	
	N (100)	188,1	100	8,8	112,2	170,7	14,1	±93,9	
	N (150)	188,1	150	8,8	110,2	177,6	59,2	±64,9	
	N (200)	188,1	200	8,8	144,6	181,6	70,7	±103,9	
2004	N (50)	103,6	50	11,2	56,5	113,7	-5,4	±21,7	
	N (100)	103,6	100	11,2	84,0	139,2	-8,3	±37,7	
	N (150)	103,6	150	11,2	100,1	143,6	21,2	±67,3	
	N (200)	103,6	200	11,2	106,0	145,2	63,6	±41,1	

Balance = entradas - salidas. Entradas: N inicial en el suelo (N_{S_INI}), fertilización (N_F) y masa de N en el riego (N_R). Salidas: extracción del cultivo (N_C) y N final en el suelo (N_{S_FIN}). ‡ Estimado a partir del valor medio del contenido de N en el agua de riego (Tabla III.11).

VI.3.2. Efecto del fraccionamiento de N

VI.3.2.1. Rendimiento y crecimiento del arroz

En ninguno de los años del estudio se observaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de fraccionamiento del N en cuanto al rendimiento, la biomasa y el índice de cosecha (Tabla VI.27). Sin embargo, en los años con producciones aceptables (campañas de 2003 y 2004), se observó que el mayor rendimiento y la mayor biomasa se obtuvieron con el fraccionamiento del N al 50% entre presiembra y ahijado, y que los menores valores se obtuvieron cuando el N se aportó en tres veces. Asimismo, en el año 2004 se observó una mayor incidencia de *Pyricularia* en el tratamiento en el que el N se aportó en tres veces.

Tabla VI.27. Rendimiento, biomasa e índice de cosecha (IC) del arroz en los distintos tratamientos de fraccionado de nitrógeno aplicados en los años 2002, 2003 y 2004.

N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)			Biomasa (t ha ⁻¹)			IC		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	2,52	5,63	6,59	5,86	11,88	11,82	0,40	0,35	0,56
75+75+0	2,41	5,97	7,13	6,54	12,85	12,27	0,34	0,35	0,60
75+37,5+37,5	2,58	5,12	5,25	6,56	9,98	9,58	0,36	0,37	0,57

Nivel de significación: NS: efecto no significativo al nivel de $p < 0,05$.

Los componentes del rendimiento que se midieron tampoco resultaron afectados significativamente por el fraccionado del N, no hallándose diferencias en la densidad de panículas por m², ni el PHL ni el PMG (Tabla VI.28). Aunque las diferencias no fueron significativas, se observó un menor número de panículas con el fraccionamiento tardío del N.

Tabla VI.28. Valores medios de la densidad de panículas, PHL y PMG en los distintos tratamientos de fraccionado de nitrógeno aplicados en los años 2002, 2003 y 2004.

Tratamiento N (kg ha ⁻¹)	Panículas (nº m ⁻²)			PHL (kg hL ⁻¹)			PMG (g)		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
	NS NS			NS NS NS			NS NS NS		
150+0+0	-	545,0	481,8	52,10	59,09	58,15	22,08	24,86	23,38
75+75+0	-	632,3	465,8	50,80	59,35	58,40	21,28	23,73	23,50
75+37,5+37,5	-	468,1	345,0	50,98	59,68	57,05	21,84	23,94	23,20

Nivel de significación: NS: efecto no significativo al nivel de $p < 0,05$.

VI.3.2.2. Radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR)

La radiación fotosintéticamente activa interceptada por el arroz en floración no se vio significativamente afectada por el fraccionamiento del N, con valores superiores en los dos últimos años de ensayo respecto a los obtenidos en el primer año del ensayo (Tabla VI.29). Estos resultados del IPAR son consistentes con los resultados obtenidos en cuanto a rendimiento en grano, biomasa e IC (Tabla VI.27), en que tampoco hubo diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla VI.29. Radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el arroz en floración en los ensayos de fraccionamiento de N.

Tratamiento N (kg ha ⁻¹)	IPAR (%)		
	2002 (19 sept.)	2003 (25 agosto)	2004 (10 agosto)
	NS NS NS		
150+0+0	71,0	87,8	88,4
75+75+0	77,9	85,3	90,7
75+37,5+37,5	78,7	79,8	87,4

Nivel de significación: NS: efecto no significativo al nivel de $p < 0,05$.

VI.3.2.3. Contenido en nutrientes

El contenido de N en hoja estuvo en el rango de valores óptimos establecidos por Dobermann y Fairhust (2002) y sólo se vio afectado por los tratamientos de fraccionamiento del N en el estadio de pleno ahijado en 2002. En este año, se observó un mayor contenido de N en hoja con el fraccionamiento del N al 50% entre presiembrado y ahijado respecto de la aplicación de todo el N en presiembrado (Tablas VI.10 y VI.30). El contenido de N en la hoja bandera en floración fue mayor en 2003 que en los otros dos años de ensayos. El contenido en N del grano y la paja del arroz en cosecha no se vieron afectados significativamente por el fraccionamiento del N. En el año 2004 el contenido de N en

el grano y la paja fueron menores que en los años anteriores, estando los tratamientos de abonado en fondo al 100% y el fraccionado al 50% entre fondo y ahijado por debajo de los valores óptimos (0,9-1,2% en grano y 0,6-0,8% en paja).

Tabla VI.30. Contenido de N en plantas de arroz muestreadas a lo largo de las tres campañas en los ensayos de fraccionamiento de N.

N (kg ha ⁻¹)	N (%)				
	Hoja			Planta	
	Inicio ahijado	Pleno ahijado	Floración	Grano	Paja
<i>2002</i>	NS	S	NS	NS	NS
150+0+0	3,61	3,03 b	2,70	1,28	0,62
75+75+0	3,93	3,43 a	2,84	1,29	0,68
75+37,5+37,5	3,72	3,21 ab	2,88	1,21	0,65
<i>2003</i>	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	4,17	3,48	3,22	1,34	0,68
75+75+0	3,99	3,38	3,24	1,33	0,70
75+37,5+37,5	3,82	3,20	3,69	1,41	0,75
<i>2004</i>	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	4,73	2,82	2,06	1,09	0,58
75+75+0	4,83	3,09	2,20	1,10	0,56
75+37,5+37,5	4,51	3,30	2,13	1,20	0,60

Para cada columna y año, valores con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). Nivel de significación: NS: efecto no significativo ($p > 0,05$). S: efecto significativo ($p < 0,05$).

En cuanto al resto de nutrientes analizados, cabe destacar que en líneas generales no hubo efecto significativo del fraccionado de nitrógeno en su contenido en hoja. Solo hubo un efecto sobre el contenido de Cu, Fe, K y Mn en uno de los tres años en cada caso (Tabla VI.31). En floración hubo deficiencia en hoja en P ($< 0,18\%$) en las campañas 2002 y 2004 y en K ($< 1,2\%$) en las tres campañas. En pleno ahijado hubo deficiencia en Zn ($< 20 \text{ mg kg}^{-1}$) en las tres campañas.

En la paja no se alcanzaron los valores óptimos de contenido en P (0,6-0,8%) en algunos tratamientos de 2002 y 2004 y hubo deficiencia en Cu ($< 6 \text{ mg kg}^{-1}$) en los mismos años. El contenido en nutrientes de la paja no se vio afectado significativamente por el fraccionamiento del N. En el caso del contenido en nutrientes del grano el fraccionamiento del N afectó al contenido en P en los años 2002 y 2004 y al contenido en Fe en 2003 y al de Mg en 2004, los dos últimos con el mayor valor en el fraccionado en 50% en presiembra y 25% en dos coberteras (tratamiento 75+37,5+37,5) (Tabla VI.32).

Tabla VI.31. Valores medios del contenido en P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn de hojas muestreadas a lo largo de las tres campañas en el ensayo de fraccionamiento de N.

Tratamiento	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
N (kg ha ⁻¹)	%				mg kg ⁻¹			
<u>2002</u>								
<i>Inicio de ahijado</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,165	1,98	0,42	0,202	160	24,2	6,12	14,3
75+75+0	0,183	2,10	0,49	0,219	169	25,3	5,44	20,5
75+37,5+37,5	0,171	1,97	0,46	0,206	158	21,9	4,64	14,0
<i>Pleno ahijado</i>	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,155	1,40	0,43	0,136 b	78	28,4	5,44	14,1
75+75+0	0,176	1,59	0,52	0,193 a	83	31,7	9,81	19,8
75+37,5+37,5	0,157	1,50	0,48	0,173 a	89	28,5	6,03	17,4
<i>Floración</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS
150+0+0	0,164	1,07	0,45	0,078	51	46,3	4,40 b	9,6
75+75+0	0,160	1,15	0,44	0,079	54	39,3	5,37 a	10,8
75+37,5+37,5	0,164	1,18	0,47	0,078	53	40,4	5,32 a	9,8
<u>2003</u>								
<i>Inicio de ahijado</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,213	2,21	0,47	0,299	74	43,4	8,87	21,4
75+75+0	0,199	2,24	0,49	0,289	107	44,7	9,53	21,7
75+37,5+37,5	0,207	2,10	0,50	0,276	87	47,4	9,89	19,2
<i>Pleno ahijado</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,189	1,73	0,34	0,090	41,4	19,3	5,20	13,9
75+75+0	0,184	1,56	0,35	0,086	32,6	22,3	5,11	13,2
75+37,5+37,5	0,187	1,67	0,38	0,091	28,9	17,2	5,05	12,7
<i>Floración</i>	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS
150+0+0	0,208	1,18	0,47	0,100	60 b	26,4	5,75	8,6
75+75+0	0,209	1,19	0,45	0,093	55 b	27,6	5,51	9,2
75+37,5+37,5	0,219	1,19	0,53	0,125	75 a	45,3	7,18	8,7
<u>2004</u>								
<i>Inicio de ahijado</i>	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	NS
150+0+0	0,247	2,27 ab	0,53	0,289	125 ⁱ	41,7 a	7,67	24,0
75+75+0	0,257	2,35 a	0,50	0,301	101	40,2 a	6,99	26,4
75+37,5+37,5	0,256	2,22 b	0,50	0,277	91	32,7 b	6,73	23,4
<i>Pleno ahijado</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,178	1,62	0,35	0,118	86	34,6	13,1	9,2
75+75+0	0,177	1,75	0,40	0,135	84	37,0	11,9	9,7
75+37,5+37,5	0,195	1,71	0,41	0,150	82	36,3	14,1	9,6
<i>Floración</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,132	1,06 b	0,82	0,061	63	42,7	4,81	7,8
75+75+0	0,125	1,16 a	0,84	0,065	64	45,3	5,35	9,0
75+37,5+37,5	0,140	1,16 a	0,89	0,080	70	40,9	5,38	9,5

Para cada columna, año y momento de muestreo, valores con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). Nivel de significación: NS: efecto no significativo ($p > 0,05$). S: efecto significativo ($p < 0,05$). i: significativo al nivel de 0,611.

Tabla VI.32. Valores medios del contenido en P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn del grano y la paja en cosecha en las distintas campañas del ensayo de fraccionamiento de N.

Tratamiento	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
N (kg ha ⁻¹)	%				mg kg ⁻¹			
<i>2002</i>								
<i>Grano</i>	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,234 a	0,35	0,07	0,106	32	18,6	4,99	9,6
75+75+0	0,207 b	0,35	0,08	0,097	26	16,2	5,06	10,8
75+37,5+37,5	0,209 b	0,36	0,09	0,100	37	14,7	4,47	9,8
<i>Paja</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,059	1,23	0,44	0,120	135	46,9	3,90	19,5
75+75+0	0,064	1,31	0,43	0,129	116	39,0	4,06	22,8
75+37,5+37,5	0,057	1,30	0,45	0,136	134	50,0	4,71	19,9
<i>2003</i>								
<i>Grano</i>	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS
150+0+0	0,252	0,22	0,06	0,114	59 b	8,5	6,92	21,9
75+75+0	0,249	0,21	0,05	0,116	49 c	13,2	5,68	20,6
75+37,5+37,5	0,259	0,20	0,06	0,115	72 a	11,2	6,91	21,8
<i>Paja</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,067	1,42	0,55	0,193	97	17,0	10,9	6,8
75+75+0	0,066	1,47	0,52	0,194	101	22,4	10,5	10,1
75+37,5+37,5	0,066	1,61	0,49	0,215	91	22,9	12,5	9,6
<i>2004</i>								
<i>Grano</i>	S	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,275 a	0,21	0,08	0,103 b	79	16,7	4,99	18,3
75+75+0	0,246 b	0,21	0,06	0,098 b	71	12,0	5,49	16,5
75+37,5+37,5	0,276 a	0,22	0,07	0,108 a	51	13,0	4,08	18,1
<i>Paja</i>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
150+0+0	0,053	1,84	0,70	0,210	82	19,8	4,08	11,7
75+75+0	0,036	1,86	0,68	0,196	83	23,4	3,73	10,8
75+37,5+37,5	0,066	1,80	0,69	0,201	118	18,3	3,77	11,1

Para cada columna, año y tipo de muestra, valores con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). Nivel de significación: NS: efecto no significativo ($p > 0,05$). S: efecto significativo ($p < 0,05$).

VI.3.2.4. Contenido de N inorgánico del suelo

El contenido de N inorgánico en el suelo antes de la siembra mostró valores menores conforme aumentó la profundidad (Figura VI.7). Sin embargo, en cosecha del arroz se observó el comportamiento contrario. El contenido de N inorgánico en el suelo en cosecha no se ha visto significativamente afectado por el fraccionado del nitrógeno. En general, en cosecha el contenido en N inorgánico del suelo fue menor que el inicial antes de la siembra del arroz en la capa más superficial, ocurriendo lo contrario en la capa más profunda. Esto indica que ha habido un movimiento del abono nitrogenado hacia capas más profundas.

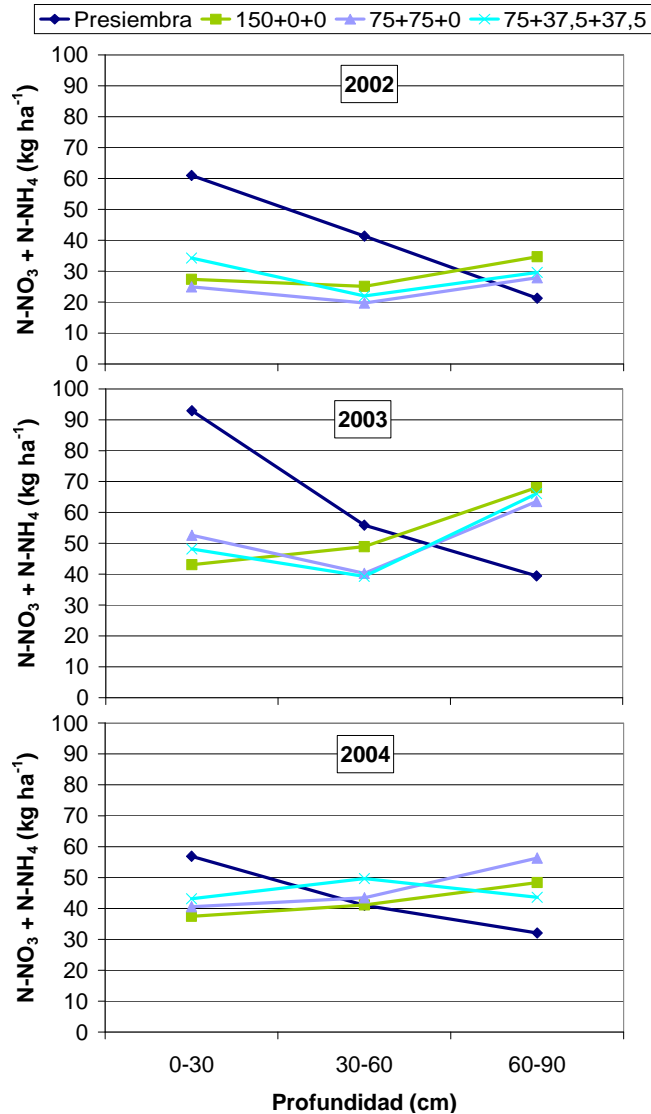


Figura VI.7. Contenido de nitrato y amonio del suelo a diferentes profundidades en presiembra y al final del ensayo en los tratamientos de fraccionado del N en los años 2002, 2003 y 2004.

Al hacer el balance del N en el suelo de 0 a 90 cm de profundidad, se observa que en la campaña 2002, en la que hubo una menor extracción de N por el cultivo por las condiciones climatológicas adversas que redujeron de manera importante el rendimiento, hubo una mayor pérdida de N que fue fuera del perfil analizado (Tabla VI.33). Estas pérdidas fueron menores en la campaña 2003 y sobre todo en la campaña de 2004, especialmente en el tratamiento de fraccionado al 50% entre fondo y ahijado ambos años.

Tabla VI.33. Balance de N en el suelo de 0 a 90 cm de profundidad en las 3 campañas en el ensayo de fraccionado de N.

Año	Tratamiento	N (kg ha ⁻¹)					Balance
		Entradas			Salidas		
		N _{S_INI}	N _F	N _R *	N _C	N _{S_FIN}	
2002	150+0+0	123,7	150	13,5	48,6	87,2	151,5 ±16,4
	75+75+0	123,7	150	13,5	57,1	72,6	157,5 ±11,3
	75+37,5+37,5	123,7	150	13,5	55,5	85,9	145,8 ±30,4
2003	150+0+0	188,1	150	8,8	104,3	160,0	82,7 ±59,0
	75+75+0	188,1	150	8,8	125,1	156,4	65,4 ±87,6
	75+37,5+37,5	188,1	150	8,8	100,5	153,6	92,8 ±72,6
2004	150+0+0	103,6	150	11,2	99,9	127,0	37,9 ±33,1
	75+75+0	103,6	150	11,2	108,1	140,3	16,3 ±31,6
	75+37,5+37,5	103,6	150	11,2	89,9	136,5	38,4 ±52,4

Balance = entradas - salidas. Entradas: N inicial en el suelo (N_{S_INI}), fertilización (N_F) y masa de N en el riego (N_R). Salidas: extracción del cultivo (N_C) y N final en el suelo (N_{S_FIN}).
 * Estimado a partir del valor mediodiurno contenido de N en el agua de riego (Tabla III.11).

VI.4. DISCUSIÓN.

Los resultados de los ensayos de respuesta del arroz a la fertilización nitrogenada y fosfórica han mostrado cierta variabilidad. En el año 2002 las producciones de biomasa y de grano fueron muy bajas en ambos ensayos, debido a la meteorología adversa para el desarrollo del cultivo y, sobre todo, en la fase de llenado del grano. Dicha meteorología afectó de forma general a los productores de arroz en el Valle del Ebro, que obtuvieron rendimientos muy bajos. Por ello los resultados de este año deben considerarse con precaución y no se van a considerar en la Discusión.

Los resultados del ensayo de fertilización nitrogenada y fosfórica mostraron un claro y significativo efecto de la dosis de N en el rendimiento en grano y en la biomasa aérea del arroz, con un aumento del rendimiento conforme aumentó la dosis de N (2003 y 2004) con rendimientos cercanos e incluso superiores a los obtenidos esos años por agricultores de cultivo tradicional de arroz con riego por inundación (promedio en Aragón de 5,8 t ha⁻¹ en 2003 y 5,2 t ha⁻¹ en 2004 según datos de la DGA (2008)). Así mismo, en el año 2003 se observó un efecto significativo del P en el rendimiento en grano y en la biomasa aérea del arroz, que aumentaron al incrementar la dosis de P aplicada. En la parcela en que se llevó a cabo el ensayo en 2003 el nivel inicial de P en el suelo era bajo en el perfil de 0-30 cm en donde el arroz desarrolla principalmente sus raíces (4 mg kg⁻¹ P Olsen) según la clasificación de López Ritas y López Melida (1978), al contrario que en el suelo en que se desarrolló el ensayo en 2004, con un nivel inicial alto (15 mg kg⁻¹ P Olsen). Dichos niveles explican la diferencia en la significación del efecto del P en 2003 y

2004 y reflejan las diferencias de los niveles de P disponible en el suelo. El índice de cosecha en estos dos años no se vio afectado por la dosis de N y P.

El aumento del rendimiento del arroz debido a la fertilización nitrogenada (2003 y 2004) y fosfórica (2003) fue debido a una mayor densidad de panículas y no a un mayor peso del grano. Este aumento del rendimiento estuvo relacionado con el aumento de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo conforme aumentó el N aplicado los dos años (2003 y 2004) y conforme aumentó el P en 2003. El efecto del N y el P se reflejó en el contenido en nutrientes de la planta de arroz durante el ciclo de cultivo. Así, el contenido en N de las hojas aumentó al aumentar la dosis de N aplicada en todos los años y al aumentar la dosis de P en el año 2003. Weerakoon *et al.* (2000) han observado una mayor eficiencia en el uso de la radiación con contenidos altos de N en hoja, particularmente en los primeros estadios de desarrollo del arroz. En 2003 el contenido en P de las hojas bandera en floración aumentó al aumentar la dosis de P, lo que llevó a un aumento de los rendimientos al aumentar la dosis de P aplicada. En cosecha el contenido en N del grano aumentó al aumentar la fertilización nitrogenada en 2004, mientras que en 2003 el contenido en P del grano aumentó al aumentar la fertilización fosfórica, reflejando el elemento fertilizante más limitante en cada año. En lo que respecta al resto de nutrientes, se observó que el N y el P aumentaron el contenido de las hojas en Ca y Zn en 2003 y el N aumentó el contenido en K de las hojas en 2004. Sin embargo, la aplicación de N y P produjo reducciones en el contenido de algunos nutrientes en las hojas (Mn en 2003, Ca, Fe, Man, Cu y Zn en 2004) probablemente debido a un efecto dilución al estimular el crecimiento vegetativo del cultivo. Este efecto dilución también se puso de manifiesto en el contenido en el grano de algunos nutrientes.

En cuanto a la dosis óptima a aplicar, Aragon y De Datta (1982) observaron que en variedades modernas de arroz los mayores rendimientos (6,5-8,0 t ha⁻¹) se obtuvieron con 120 kg N ha⁻¹. Sin embargo, Spanu y Pruneddu (1997) recomiendan 150 kg N ha⁻¹ para rendimientos de 8-10 t ha⁻¹. En nuestro ensayo se observó una respuesta creciente a la dosis de N, estando la dosis óptima entre 150 y 200 kg N ha⁻¹. Aragon y De Datta (1982) observaron que en situaciones de estrés hídrico las dosis altas de N redujeron el rendimiento del arroz regado por aspersión. Sin embargo, en nuestro estudio esto no se produjo debido al adecuado aporte de riego.

Conforme aumentó la dosis de N aplicada aumentó el contenido en N inorgánico en el momento de la cosecha en el horizonte de suelo más profundo (60-90 cm). Este aumento del N inorgánico en profundidad está relacionado con el poco desarrollo de las raíces del arroz en profundidad (Battiliani y Pietrosi, 1991; Blackwell *et al.*, 1985) y es un aspecto negativo del uso de dosis altas de N ya que conlleva un mayor riesgo de pérdidas de N por lavado que se ha observado al realizar el balance de N inorgánico en el suelo. Podría re-

saltar interesante en este caso la utilización de cultivos cubierta durante el invierno para evitar estas pérdidas (Salmerón *et al.*, 2010 y 2011).

El fraccionado de la fertilización nitrogenada no aumentó significativamente el rendimiento del arroz comparado con la aplicación en fondo en ninguno de los años. Tampoco la biomasa, el índice de cosecha, la densidad de panículas y el peso del grano fueron afectados por el fraccionamiento del N fertilizante. No obstante se observó una tendencia a un rendimiento superior cuando el N se fraccionó en dos aplicaciones, la primera en fondo y la segunda en cobertura en el estadio de inicio de ahijado, lo cual concuerda con los trabajos, entre otros, de Cabangon *et al.* (2004) y Rehman *et al.* (2013) en condiciones de riego por inundación. Por el contrario, otros trabajos en arroz aeróbico como el de Sathiya y Ramesh (2009) sugieren buenos resultados con fraccionados en 4 momentos, lo que debería ser estudiado por si dichos aumentos de rendimiento compensan el incremento de costes de la aplicación tan fraccionada del N. Da Silva y Stutte (1981) encontraron que la fertilización con $\text{NH}_4\text{-N}$ es preferible en las primeras etapas de crecimiento del arroz. Sería interesante estudiar el efecto de la forma de abonado en un nuevo ensayo de fraccionado del arroz por si se pudieran conseguir mejores rendimientos.

VI.5. CONCLUSIONES.

Para obtener niveles aceptables de rendimiento de arroz bajo aspersión ($6\text{-}7\text{ t ha}^{-1}$) se necesitan aplicaciones de N de 150 a 200 kg de N ha^{-1} .

Al aumentar la dosis de N aplicado aumentaron la radiación interceptada, el contenido en N de las hojas, los componentes del rendimiento y, consiguientemente, el rendimiento.

La respuesta positiva del arroz a la fertilización fosfórica se produce, cuando las condiciones climatológicas no son adversas, en suelos con bajos contenidos en fósforo como los del ensayo de 2003 ($<5\text{ mg P Olsen kg}^{-1}$). Con niveles de P Olsen en el suelo de 15 mg kg^{-1} no se encontró respuesta.

Las dosis óptimas de fertilización nitrogenada y fosfórica siempre dependerán de los niveles iniciales de N y P en el suelo.

La respuesta del contenido en nutrientes en planta y grano ha variado en función del año y del momento de muestreo.

Los resultados de los ensayos indican que el aporte del 50% del N en cobertura en inicio del ahijado mejora el crecimiento del cultivo. Aunque no se observaron diferencias significativas entre distintos tratamientos de fraccionado de N, los mayores rendimientos se obtuvieron con el fraccionamiento del N al 50% entre presembrado y ahijado, y los menores valores se obtuvieron cuando el N se aportó en tres veces.

En uno de los años en que se desarrolló el ensayo, la aplicación tardía de N dio lugar a una mayor incidencia de *Pyricularia*.

El balance de N indicó la existencia de pérdidas, que fueron menores con las dosis de abonado nitrogenado menores de 150 kg N ha⁻¹ y cuando el N se fraccionó al 50% entre fondo e inicio de ahijado.

CAPÍTULO VII.

**CONTROL DE MALAS HIERBAS
EN ARROZ CULTIVADO BAJO
RIEGO POR ASPERSIÓN.**

VII.1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los principales cambios en el cultivo de arroz con riego por aspersión frente al sistema de cultivo tradicional con riego por inundación es el control de las malas hierbas (Akkari *et al.*, 1986; Battilani y Petrosi, 1990, Spanu *et al.*, 1992). En el cultivo tradicional el control de malas hierbas se basa en gran medida en la existencia de una lámina de agua que impide el desarrollo de especies no aptas a condiciones anaeróbicas, pero favorece la aparición de especies acuáticas y semiacuáticas. Ello provoca una selección de las especies de malas hierbas adaptadas a dichas condiciones. Por otra parte, el cultivo del arroz tradicional suele realizarse en monocultivo, donde el control de las malas hierbas resulta difícil y costoso, requiriendo un uso importante de productos herbicidas (Hill *et al.*, 1994; Tiebas y Biurrun, 1995; Florez *et al.*, 1999; Rao *et al.*, 2007).

La importancia del cultivo de arroz en el mundo ha dado lugar a un gran esfuerzo en el estudio de la competencia de las malas hierbas con el arroz, así como en su control con herbicidas o métodos culturales (Rao *et al.*, 2007). Así, en España existían en el momento de la realización de los ensayos 17 herbicidas autorizados para el control de malas hierbas en este cultivo (MAPA, 2005). Dado que la mayor parte del arroz es cultivado en condiciones de suelo inundado, los herbicidas han sido desarrollados principalmente para dichas condiciones. Sin embargo, existe poca información tanto sobre la competencia de las malas hierbas con el arroz, como sobre su control en condiciones de riego por aspersión, en la que el terreno nunca está inundado. En España la superficie de arroz en riego por aspersión es testimonial. En el mundo el riego del arroz por aspersión solamente es importante en Brasil (Pinheiro *et al.*, 2006) y China (George *et al.*, 2002). Es por ello que existe poca información sobre la competencia de las malas hierbas con el arroz y sobre la selectividad y eficacia de herbicidas cuando el arroz se riega por aspersión sin inundar el terreno (Akkari *et al.*, 1986; Spanu *et al.*, 1992). Se han hecho algunos estudios en arroz "upland" (de tierras altas, que no permanece siempre inundado) (Okafor y de Datta, 1976; Enyinnia, 1992; Esqueda, 2000), pero se trata de zonas con elevada pluviometría y no de clima semiárido como el del valle del Ebro.

Cuando el terreno no es inundado se ha observado que las especies de malas hierbas presentes en arroz son las típicas de cultivos bien regados, pero no las especies acuáticas y subacuáticas (Spanu *et al.*, 1992). Así, se ha observado una fuerte competencia de gramíneas como *Echinochloa crus-galli* y *Digitaria* spp. (Akkari *et al.*, 1986; Spanu *et al.*, 1992; Gitsopoulos y Froud-Williams, 2004) y de dicotiledóneas como *Portulaca oleracea*, *Convolvulus arvensis*, *Medicago* spp., *Solanum nigrum*, *Xanthium strumarium* y *Amaranthus* spp. (Akkari *et al.*, 1986; Battilani y Petrosi, 1990; Spanu *et al.*, 1992). Smith (1988) indica que *Echinochloa crus-galli* es un fuerte competidor cuando se

realiza la siembra del arroz en seco y se retrasa la inundación. De hecho existen diversos estudios que muestran un incremento de la competencia de *Echinochloa crus-galli* con el arroz al disminuir la profundidad de la lámina de agua y la duración del periodo de inundación (Agostinetto *et al.*, 2007; Rao *et al.*, 2007). Akkari *et al.* (1986) han observado que el control de las malas hierbas perennes *Cyperus rotundus* y *Sorghum halepense* es uno de los principales problemas de este sistema de cultivo. La importancia del *Cyperus rotundus* como mala hierba en arroz "upland" ha sido también puesta de manifiesto por Okafor y De Datta (1976).

La eficacia de los herbicidas, es decir, su acción tóxica sobre las malas hierbas, se puede ver modificada por el riego por aspersión dado que en este sistema de riego el régimen de riego frecuente puede provocar el lavado de los productos de acción foliar y/o la activación y/o la percolación de los herbicidas que actúan a través del suelo (Spanu y Pruneddu, 1998). Dado que con el riego por aspersión el suelo no está inundado, aquellos herbicidas que actúan a través del suelo serán los que más pueden ver afectado su comportamiento en comparación con el sistema de cultivo tradicional.

Entre los herbicidas que actúan a través del suelo y que se han mostrado eficaces y selectivos en arroz regado por aspersión se encuentra la pendimetalina, la dinitramina y el linurón (Spanu *et al.*, 1992). En este trabajo el control de las malas hierbas sólo resultó completo con la pendimetalina. Aunque ninguno de estos tres herbicidas está registrado para su uso en arroz en España, resulta interesante estudiar la aplicación de pendimetalina por ser un herbicida que ha mostrado una buena eficacia en el control de las malas hierbas con el sistema de riego por aspersión en otros cultivos.

Sólo la clomazona, el oxadiazón y el molinato son herbicidas que actúan a través del suelo y están registrados para su uso en arroz en preemergencia. La clomazona se ha mostrado como eficaz en el control de malas hierbas gramíneas aplicada en preemergencia o postemergencia precoz de las malas hierbas en cultivos de arroz (Jordan *et al.*, 1998a; Webster *et al.*, 1999; Scherder *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004; Talbert y Burgos, 2007), aunque se ha observado cierta fitotoxicidad que parece depender de la variedad y del sistema de implantación (Zhang *et al.*, 2004; Mudge *et al.*, 2005a). Sin embargo, no existen trabajos sobre el uso de la clomazona en arroz regado por aspersión. El oxadiazón ha sido utilizado con éxito en arroz bajo aspersión en mezcla con propanil (Akkari *et al.*, 1986), si bien es de reseñar que su acción es sobre todo contra malas hierbas dicotiledóneas (Babiker, 1982; Smith y Khodayari, 1985; Enyinnia, 1992), aunque también se observó en estos estudios diversos grados de fitotoxicidad. El molinato necesita la inundación del terreno para lograr un adecuado control de las malas hierbas, por lo que no resulta interesante en arroz regado por aspersión.

El quinclorac, que es otro herbicida que actúa a través del suelo, está autorizado para su uso en postemergencia del arroz y de las malas hierbas, pero necesita que el suelo esté continuamente húmedo para ser eficaz.

Ferguson y Gilmour (1978) encontraron problemas de control de malas hierbas en arroz cultivado con riego por aspersión cuando el cultivo de arroz se repitió varios años. Sin embargo, la rotación de cultivos que permite el riego por aspersión puede ser una característica muy favorable para el control de malas hierbas en el cultivo de arroz, evitando las infestaciones características del sistema con riego por inundación en monocultivo, como son *Echinochloa crus-galli* resistente al propanil o el arroz salvaje (*Oryza sativa*) (Baltazar y Smith, 1994; Catalá *et al.*, 2000).

El **objetivo** de este trabajo es el estudio de la selectividad y eficacia de distintos tratamientos herbicidas en el cultivo de arroz regado por aspersión con el fin de establecer el programa de tratamientos más adecuado para el control de malas hierbas en este sistema de cultivo.

VII.2. MATERIAL Y MÉTODOS.

VII.2.1. Descripción de los ensayos.

Se realizaron ensayos durante los años 2002, 2003 y 2004 en la finca experimental de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) en Montañana (Zaragoza). La caracterización edáfica y climatológica está descrita en el Capítulo III.

En todos los ensayos se utilizó la variedad Guadiamar, por ser la variedad más extendida en el Valle Medio del Ebro. Al ser de ciclo corto, se adapta adecuadamente al riego por aspersión en las condiciones climatológicas de la zona (Martínez Gómez, 2002).

VII.2.2. Prácticas culturales.

Labores

El ensayo se fertilizó en presembrado con abono 8-15-15 a una dosis de 670 kg ha⁻¹ y posteriormente se realizaron dos aplicaciones de cobertera, una en pleno ahijado y otra en iniciación de la panícula, en cada una de las cuales se aplicaron 50 kg N ha⁻¹ como nitrato amónico del 33,5%.

La siembra se realizó con sembradora convencional de cereales en líneas separadas a 13 cm, con una dosis de siembra de 230 kg ha⁻¹. La recolección del arroz se hizo con microcosechadora de 1,20 m de anchura de corte (Figura VII.1), cosechándose la parte central de cada parcela elemental (8,4 m² de superficie recolectada por parcela). En aquellos casos en que la densidad de ma-

las hierbas era tan elevada que impedía el correcto funcionamiento de la microcosechadora, se cosechó manualmente 1 m² de superficie.

En la Tabla VII.1 se muestran las fechas en que se realizaron las distintas labores en el ensayo: fertilización, siembra y cosecha.



Figura VII.1. Recolección del grano con microcosechadora de ensayos.

Tabla VII.1. Fechas en que se realizaron la siembra, cosecha y fertilización en los tres años de ensayo.

Campaña	Siembra	Cosecha	Fertilización		
			Fondo	Cobertera 1	Cobertera 2
2002	17/may/02	04/nov/02	16/may/02	12/jun/02	01/jul/02
2003	28/abr/03	29/sep/03	25/abr/03	13/jun/03	01/jul/03
2004	27/abr/04	07/oct/04	22/abr/04	21/jun/04	16/ju/04

Riego

Después de la siembra se instalaron equipos móviles de aspersion con tuberías de polietileno en un marco de 15m x 18m. Los aspersores (RC130 de Riegos Costa) disponían de dos boquillas de 4,4 mm y 2,4 mm de diámetro y se colocaron a 1,5 m de altura sobre el suelo. La pluviometría media de los aspersores fue de 5 mm h⁻¹. Para el correcto establecimiento del cultivo fue necesario iniciar todas las campañas con riegos cortos y frecuentes (diarios) para evitar el encostramiento superficial del suelo y favorecer la nascencia del arroz. Posteriormente, se pasó a regar con una frecuencia de 2-3 riegos por

semana. La cantidad de agua aplicada en los sucesivos riegos se determinó con pluviómetros instalados en la parcela experimental.

El riego aplicado se calculó en función de la ET_0 , considerando que el coeficiente de cultivo (K_c) fue 1,2 durante todo el ciclo del cultivo. La ET_0 se calculó según el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) a partir de los datos meteorológicos registrados en una estación meteorológica automática situada a 1 km.

El agua aplicada en riego varió entre 722 mm en 2002 y 885 mm en 2004. El primer riego se dio a primeros de mayo excepto en 2002 que se dio a finales de mayo debido a que la siembra fue más tardía. El último riego se dio hacia el 20 de septiembre (Tabla VII.2).

Tabla VII.2. Características del calendario de riego aplicado en los tres años de estudio.

Año	Nº de riegos	Pluviometría total (l m ⁻²)	Primer riego	Último riego
2002	52	722	29/mayo/02	20/septiembre/02
2003	72	750	02/mayo/03	18/septiembre/03
2004	83	885	07/mayo/04	27/septiembre/04

Control de plagas

En el año 2003 fue necesario tratar con fenitrotión 50% (1 L ha⁻¹) en dos ocasiones contra la oruga defoliadora *Mythimna* (*Pseudaletia*) *unipuncta* (Haworth) y una vez con deltametrín 2,5% (0,5 L ha⁻¹) + malatión 50% (1,25 L ha⁻¹) contra la langosta (*Locustotaurus maroccanus* (Thunberg)).

VII.2.3. Diseño experimental. Tratamientos herbicidas.

Se estudió la selectividad y eficacia de distintos programas de herbicidas, que incluyeron distintas combinaciones y dosis de los siguientes herbicidas: azimsulfurón 50% (Gulliver, DuPont), bensulfurón-metil 60% (Londax 60 DF, Dupont), bentazona 40% + MCPA 6% (Basagran M 60, Basf), cihalofop-butílic 20% (Clincher, Dow Agrosciences Iberica, S.A.)⁽¹⁾, cinosulfurón 20% (Setoff 20 WG, Syngenta Agro, S.A.), clomazona 36% (Command CS, FMC Foret), oxadiazón 25% (Ronstar, Aventis), pendimetalina 33% (Stomp LE, Basf), profloroxim⁽²⁾ 20% (Aura, Basf) y propanil 35% (Herbimur, Sarabia).

Se utilizó un diseño en bloques al azar con 4 repeticiones y parcelas elementales de 28 m² cada una (4m x 7m).

¹ Se aplicó junto con Surfactante DP, de la casa DuPont (éter de alquil poliglicol 44% + dioctil sulfosuccinato sódico 1,5%).

² Llamado clefoxidim hasta su modificación en la *ORDEN PRE/1672/2003* (BOE núm. 151, pág. 24386). Se aplica con el Coadyuvante Dash HD de Basf (metil oleato/metil palmitato 34,5%).

Cada año se ensayaron 8 programas de herbicidas y se mantuvo una parcela sin tratar (parcela testigo) (Tablas VII.3 a VII.5). La selección de los programas se hizo en función de la bibliografía y de los resultados obtenidos en la campaña anterior, con el objetivo de encontrar el programa herbicida más adecuado. En el año 2004, dada la alta densidad de *Cyperus rotundus*, los tratamientos herbicidas de postemergencia se eligieron específicamente contra esta mala hierba.

Tabla VII.3. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2002.

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)	
#	PRE [2 STS] (Dosis) / POST1 [7 STS] y POST2 [10 STS] (Dosis)
1	Testigo sin escarda / Sin escarda
2	Sin escarda / 1: Azimsulfurón (0,025) + cinosulfurón (0,08)
3	Sin escarda / 1: Bensulfurón (0,051) + propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
4	Sin escarda / 1: Cihalofop-butil (0,3) + bensulfurón (0,051) 2: Propanil (3,5)
5	Sin escarda / 1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
6	Clomazona (0,36) / 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32) / Sin escarda
8	Oxadiazón (0,5) / 1: Profoxidim (0,14)
9	Pendimetalina (1,32) / Sin escarda

PRE: preemergencia; POST1: postemergencia precoz; POST2: postemergencia tardía; STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.4. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2003.

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)	
#	PRE [0 STS] (Dosis) / POST1 [2 STS] y POST2 [8 STS] (Dosis)
1	Testigo sin escarda / Sin escarda
2	Sin escarda / 1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
3	Clomazona (0,36) / 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
4	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25) / 2: Azimsulfurón (0,025)
5	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32) / 2: Propanil (3,5)
6	Oxadiazón (0,5) / 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)
7	Oxadiazón (0,5) / 2: Azimsulfurón (0,020)
8	Pendimetalina (0,99) / 2: Clomazona (0,36) + propanil (1,75)
9	Pendimetalina (1,32) / 2: Propanil (3,5)

PRE: preemergencia; POST1: postemergencia precoz; POST2: postemergencia tardía; STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.5. Momento de aplicación, herbicida y dosis de materia activa aplicados por hectárea en los distintos tratamientos en 2004.

#	Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)	
	PRE [1 STS] (Dosis)	POST1 [6 STS] y POST2 [9 STS] (Dosis)
1	Testigo sin escarda	Sin escarda
2	Clomazona (0,27)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)
3	Clomazona (0,36)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)
4	Clomazona (0,27) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,020)
5	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,025)
6	Clomazona (0,36) + pendimetalina (0,66)	1: Azimsulfurón (0,025)
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	1: Azimsulfurón (0,020)
8	Oxadiazón (0,5)	1: Bentazona (2) + MCPA (0,3) 2: Azimsulfurón (0,020)
9	Pendimetalina (1,32)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)

PRE: preemergencia; POST1: postemergencia precoz; POST2: postemergencia tardía; STS: semanas tras siembra.

Los herbicidas se aplicaron con un pulverizador de precisión a una presión de 200 kPa, un volumen de aplicación de 300 L ha⁻¹ y boquillas de abanico plano (Figura VII.2). Los tratamientos de preemergencia, postemergencia precoz y tardía se aplicaron en las fechas que se indican en la Tabla VII.6.

**Figura VII.2.** Equipo empleado para la aplicación de los tratamientos herbicidas.

Tabla VII.6. Fechas en que se realizaron los tratamientos de preemergencia, postemergencia precoz y postemergencia tardía en los tres años de ensayo.

Campaña	Preemergencia	Postemergencia precoz	Postemergencia tardía
2002	27/mayo/02	02/julio/02	23/julio/02
2003	02/mayo/03	12/junio/03	09/julio/03
2004	05/mayo/04	11/junio/04	01/julio/04

A continuación se describen las principales características de los distintos herbicidas empleados en los ensayos, clasificados según su momento de aplicación (Liñán, 2005; HRAC, 2005):

Herbicidas de preemergencia:

- **Clomazona.** Herbicida de pre y postemergencia precoz de la familia química de las isoxazolidinonas. Su modo de acción, por contacto y sistémico, es la inhibición de la síntesis de los carotenoides provocando la decoloración de la planta. Su vida media en el suelo es variable (de 2 a 10 semanas). Controla *Echinochloa crus-galli*, *Abutilon theophrasti*, *Amaranthus hybridus*, *Chenopodium album*, *Datura stramonium*, *Digitaria sanguinalis*, *Galium aparine*, *Polygonum spp.*, *Portulaca oleracea*, *Solanum nigrum* y *Xanthium strumarium*.

- **Oxadiazón.** Es un herbicida de pre y postemergencia de la familia química de los oxadiazoles, que actúan inhibiendo la protoporfirinógeno oxidasa (PPO) y por tanto, interfiriendo en la división celular. Es muy poco soluble, con una persistencia en el suelo de 3 a 6 meses. Controla: *Alisma plantago-aquatica*, *Alopecurus myosuroides*, *Amaranthus spp.*, *Anagallis arvensis*, *Avena spp.*, *Capsella bursa-pastoris*, *Chenopodium spp.*, *Convolvulus arvensis*, *Echinochloa crus-galli*, *Hetheranthera spp.*, *Plantago lanceolata*, *Portulaca oleracea*, *Setaria spp.* y *Solanum nigrum*.

- **Pendimetalina.** Herbicida de pre y postemergencia precoz de la familia de las dinitroanilinas, que actúan inhibiendo la unión de los microtúbulos en la mitosis (interfiere la división del núcleo de la célula). Se trata de un herbicida residual con una persistencia de 3 a 4 meses. Controla *Alopecurus myosuroides*, *Amaranthus spp.*, *Chenopodium spp.*, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa spp.*, *Setaria spp.* y *Solanum nigrum*.

Herbicidas de postemergencia:

- **Azimsulfurón.** Herbicida sistémico de la familia de las sulfonilureas que interfiere en la síntesis de los aminoácidos isoleucina, leucina y valina y por tanto inhibe la división y el crecimiento celular. Es absorbido por hojas y brotes y en menor medida por las raíces. Controla *Echinochloa spp.*, *Alisma plantago-aquatica*, *Ammannia coccinea*, *Bergia*, *Cyperus difformis*, *Hetheranthera*, *Potamogeton nodosus*, *Scirpus spp.*, *Typha spp.*

- **Bentazona+MCPA.** Herbicida sistémico absorbido por vía foliar, de las familias químicas benzotriazolones (bentazona) y ácidos fenoxi-carboxílicos (MCPA) respectivamente, que actúan por inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II y mediante auxinas sintéticas. Controla: *Alisma plantago-aquatica*, *Amaranthus* spp., *Ammannia coccinea*, *Atriplex* spp., *Capsella bursa-pastoris*, *Chenopodium album*, *Cyperus difformis*, *Datura stramonium*, *Euphorbia* spp., *Juncus* spp., *Galium aparine*, *Portulaca oleracea*, *Raphanus raphanistrum*, *Scirpus* spp., *Senecio*, *Sinapis*, *Solanum nigrum*, *Sonchus* spp., *Typha* spp.

- **Bensulfurón-metil.** Herbicida sistémico de la familia química de las sulfonilureas. Actúa por inhibición de la acetolactato sintetasa ALS. Controla *Alisma plantago-aquatica*, *Ammannia coccinea*, *Bergia aquatica*, *Cyperus difformis*, *Scirpus* spp.

- **Cihalofop-butil.** Herbicida sistémico de la familia de los aryloxfenoxi-propionatos, que actúan por inhibición de la coenzima acetil carboxilasa (ACCasa). Es absorbido por hojas y tallos. Controla el género *Echinochloa*.

- **Cinosulfurón.** Herbicida sistémico de la familia de las sulfonilureas. Se absorbe por vía foliar y radicular, deteniendo el crecimiento de brotes y raíces al inhibir la actividad meristemática. Controla *Alisma plantago-aquatica*, *Ammannia coccinea*, *Bergia aquatica*, *Cyperus difformis*, *Scirpus* spp. y *Potamogeton nodosus*.

- **Profoxidim.** Herbicida sistémico que pertenece a la familia de las ciclohexanonas, y actúa por inhibición de la acetil CoA carboxilasa (ACCasa), interfiriendo la biosíntesis de los lípidos. Es absorbido por las partes verdes de la planta. Controla *Echinochloa* spp. y otras gramíneas.

- **Propanil.** Herbicida de contacto y sistémico, absorbido por las hojas, es una amida que actúa por inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II. Controla *Alisma plantago-aquatica*, *Cyperus difformis*, *E. crus-galli*, *Lemna gibba*, *Polygonum* spp., *Potamogeton nodosus*, *Scirpus* spp., *Typha latifolia* y algas.

VII.2.4. Medidas de selectividad, eficacia y rendimiento.

La **selectividad** se estimó mediante la determinación de la densidad de plantas de arroz emergidas y la valoración visual de la fitotoxicidad.

La densidad de plantas se determinó seis semanas tras la siembra mediante conteo de las plantas de arroz en cuatro tiradas de un marco de 0,27 m² en cada parcela elemental.

La valoración visual de la fitotoxicidad se realizó en distintos momentos (Tabla VII.7) comparando los síntomas que se observaban en las parcelas con tratamientos herbicidas con las parcelas testigo sin tratar, según una escala de 0 a 10 teniendo en cuenta la descripción de la Tabla VII.8.

Tabla VII.7. Fecha de las distintas valoraciones de selectividad y eficacia efectuadas a lo largo de las 3 campañas de ensayos en semanas tras la siembra (STS).

Año	Fechas de las valoraciones de selectividad y eficacia en STS			
	Preemergencia	Postemergencia precoz	Postemergencia tardía	Valoración final
2002	6	10	12	19
2003	6	10	10	19
2004	6	9	11	20

Tabla VII.8. Descripción de la escala de valoración visual de la fitotoxicidad.

Valoración visual de fitotoxicidad	Tipo de daño
0	No se aprecian daños en el cultivo.
Leve	1 Se observan daños ligeros. Ligeras decoloraciones (menos del 10% del cultivo afectado).
	2 Se observa algún efecto (10-25% de afección en el cultivo).
	3 Efectos visibles (25%).
Moderada	4 Los efectos empiezan a ser importantes (25-50% del cultivo se ve afectado).
	5 Efectos importantes (más del 50% del cultivo está afectado). Algunas plantas están muertas.
	6 Mortalidad del cultivo inferior al 10%.
	7 Mortalidad del cultivo del 10-25%.
Grave	8 Mortalidad del cultivo del 25-50%.
	9 Mortalidad del cultivo del 50-75%.
	10 Mortalidad del cultivo del 75-100%.

La **eficacia** se valoró determinando la densidad de las distintas malas hierbas mediante el conteo de éstas. El conteo se realizó utilizando un marco de 0,27 m² y contando el número de malas hierbas presentes en 4 tiradas al azar dentro de cada parcela elemental. Las valoraciones posteriores a la floración del arroz se realizaron visualmente comparando, con una escala de 0 a 100, los distintos programas con las parcelas testigo (Tabla VII.9). Los conteos de malas hierbas se realizaron seis semanas tras la siembra del arroz para la valoración de tratamientos de preemergencia y entre dos y tres semanas después de efectuar los tratamientos herbicidas de postemergencia. La valoración visual se realizó aproximadamente cuatro semanas antes de la cosecha los tres años y dos semanas tras el tratamiento de postemergencia tardía en la campaña de 2004 (Tabla VII.7).

El **rendimiento** se determinó a partir del peso de arroz cosechado y de su humedad, transformándose en rendimiento en grano al 14% de humedad.

Tabla VII.9. Descripción de la escala de valoración visual de la eficacia (adaptado de EWRC, en Australian Weeds Committee, 1979).

Control de malas hierbas (%)	Eficacia (mortalidad de malas hierbas)
0 - 29	Ninguna
30 - 54	Muy pobre
55 - 69	Pobre
70 - 81	Débil
82 - 89	Moderado, pero generalmente no aceptado
90 - 94	Bueno – aceptable
95 - 97	Muy bueno
98 - 99	Excelente
100	Completa eliminación

VII.2.5. Análisis estadístico.

El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA y separación de medias con el test LSD ($\alpha=0,05$). En el caso de la densidad de malas hierbas se transformaron los datos con $(x+0,5)^{1/2}$ para lograr la normalidad. Los datos de densidad de malas hierbas que aparecen en las tablas de resultados son los datos sin transformar. Se realizó un análisis de regresión múltiple "stepwise" para determinar la importancia de la selectividad y el control de malas hierbas en el rendimiento del arroz, utilizando las variables valoración visual de control de gramíneas (ControlGRA), de dicotiledóneas (ControlDIC), de ciperáceas (ControlCYP), de fitotoxicidad en cosecha (FITOCosecha), ControlGRA², ControlDIC², ControlCYP², FITOCosecha² y sus interacciones simples. El programa empleado ha sido STATGRAPHICS Plus 5.0.

VII.3. RESULTADOS.

VII.3.1. Selectividad.

Las Tablas VII.10 a VII.12 presentan los resultados del número de plantas emergidas a las 6 semanas tras la siembra (STS) y de la fitotoxicidad observada en distintas fechas en los distintos tratamientos herbicidas durante los tres años de ensayo.

VII.3.1.1. Densidad de plantas de arroz.

En 2002 se observó que el tratamiento con pendimetalina a 1,32 kg ha⁻¹ disminuyó la densidad de plantas de arroz respecto del testigo, mientras que el tratamiento con clomazona a 0,36 kg ha⁻¹ presentó una mayor densidad de plantas de arroz que el testigo (Tabla VII.10). Aunque en los años siguientes no se observaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos, el tratamiento con pendimetalina a 1,32 kg ha⁻¹ (sola o en mezcla con clomazo-

na) pareció tener una tendencia a reducir el número de plantas de arroz respecto del testigo en 2003 (Tablas VII.11 y VII.12).

VII.3.1.2. Fitotoxicidad visual.

Todos los tratamientos con clomazona en preemergencia mostraron síntomas de fitotoxicidad de leves a moderados tras la emergencia del cultivo (Tablas VII.10 a VII.12), con el blanqueamiento característico de las hojas (Figura VII.3). Estos síntomas fueron desapareciendo con el paso del tiempo, no observándose ya en la valoración previa a la cosecha. Los tratamientos con oxadiazón y pendimetalina en preemergencia no mostraron síntomas visuales de fitotoxicidad, aunque cuando se usaron en mezcla con clomazona aumentaron ligeramente dichos síntomas.



Figura VII.3. Blanqueamiento en hojas de arroz producido por el herbicida clomazona.

En postemergencia, la aplicación temprana de azimsulfuron (POST1) dio lugar a síntomas moderados de fitotoxicidad (Tablas VII.10 y VII.12), mientras que su aplicación más tardía (POST2) disminuyó los síntomas (Tablas VII.11 y VII.12). En 2003, el azimsulfuron a la dosis de $0,020 \text{ kg ha}^{-1}$ resultó menos fitotóxico que a la de $0,025 \text{ kg ha}^{-1}$. El tratamiento con bentazona+MCPA en postemergencia no produjo síntomas visuales de fitotoxicidad. La clomazona aplicada en postemergencia junto con el propanil (Tabla VII.11) produjo síntomas moderados de fitotoxicidad. El resto de tratamientos de postemergencia no presentaron síntomas visuales de fitotoxicidad.

En cosecha ningún programa mostró fitotoxicidad visual, con la excepción del tratamiento con azimsulfurón + cinosulfurón en postemergencia precoz en 2002, que dio lugar a una fitotoxicidad moderada en cosecha.

Tabla VII.10. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2002, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.

#	Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Plantas de arroz (N° m ⁻²)	Fitotoxicidad (escala 0-10)			
	PRE [2 STS] (Dosis)	POST1 [7 STS] y POST2 [10 STS] (Dosis)		PRE	POST1	POST2	Cosecha
			6 STS	6 STS	10 STS	12 STS	19 STS
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	267 b	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
2	Sin escarda	1: Azimsulfurón (0,025) + cinosulfurón (0,08)	-	-	2,5 a	-	4,0 c
3	Sin escarda	1: Bensulfurón (0,051) + propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	-	0,8 a	0,0 a	0,0 a
4	Sin escarda	1: cihalofop-butil (0,3) + bensulfurón (0,051) 2: Propanil (3,5)	-	-	0,3 a	0,8 a	0,5 ab
5	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	-	1,5 a	1,5 a	0,0 a
6	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	441 c	3,0 b	1,0 a	1,5 a	2,0 b
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	Sin escarda	237 ab	3,5 b	1,8 a	-	0,0 a
8	Oxadiazón (0,5)	1: Profoxidim (0,14)	261 ab	0,3 a	2,8 a	-	1,0 ab
9	Pendimetalina (1,32)	Sin escarda	196 a	0,0 a	0,5 a	-	0,0 a

En los tratamientos 2 a 5, sin tratamiento de preemergencia, no se realizó el conteo de plantas de arroz por considerarlo igual que el testigo sin escarda. Tampoco se hizo la valoración de la fitotoxicidad en aquellos tratamientos en que no se aplicó herbicida. El número entre paréntesis en los tratamientos indica la dosis en kg de materia activa por hectárea. Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.11. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2003, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Plantas de arroz (Nº m ⁻²)	Fitotoxicidad (escala 0-10)			
# PRE [0 STS] (Dosis)	POST1 [2 STS] y POST2 [8 STS] (Dosis)		PRE	POST2	Cosecha	
		6 STS	6 STS	10 STS	19 STS	
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	306 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
2	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	284 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
3	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	305 a	3,2 b	1,0 abc	0,0 a
4	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	2: Azimsulfurón (0,025)	286 a	2,5 b	3,2 de	0,5 ab
5	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	216 a	3,0 b	2,2 cd	1,0 b
6	Oxadiazón (0,5)	2: Azimsulfurón (0,020)	279 a	0,2 a	1,5 bc	0,0 a
7	Oxadiazón (0,5)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	274 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
8	Pendimetalina (0,99)	2: Clomazona (0,36) + propanil (1,75)	297 a	0,2 a	3,7 e	0,0 a
9	Pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	234 a	0,7 a	0,5 ab	0,0 a

El número entre paréntesis en los tratamientos indica la dosis en kg de materia activa por hectárea. Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.12. Densidad de plantas de arroz y fitotoxicidad visual en 2004, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1), postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de la cosecha.

#	Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Plantas de arroz (N° m ⁻²)	Fitotoxicidad (escala 0-10)			
	PRE [1 STS] (Dosis)	POST1 [6 STS] y POST2 [9 STS] (Dosis)		PRE	POST1	POST2	Cosecha
			6 STS	6 STS	9 STS	11 STS	20 STS
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	188 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
2	clomazona (0,27)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,02)	174 a	2,2 b	0,7 a	2,7 b	1,2 a
3	Clomazona (0,36)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,02)	167 a	2,5 bc	0,7 a	3,0 b	1,2 a
4	Clomazona (0,27) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,02)	154 a	2,7 bc	3,7 b	2,5 b	0,5 a
5	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,025)	196 a	3,0 c	4,0 b	2,5 b	0,7 a
6	Clomazona (0,36) + pendimetalina (0,66)	1: Azimsulfurón (0,025)	211 a	1,7 b	4,0 b	3,0 b	0,5 a
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	1: Azimsulfurón (0,02)	177 a	2,7 bc	4,2 b	2,7 b	0,7 a
8	Oxadiazón (0,5)	1: Bentazona (2) + MCPA (0,3) 2: Azimsulfurón (0,02)	163 a	0,5 a	0,0 a	2,7 b	0,7 a
9	Pendimetalina (1,32)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,02)	171 a	0,5 a	0,5 a	2,7 b	1,0 a

El número entre paréntesis en los tratamientos indica la dosis en kg de materia activa por hectárea. Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

VII.3.2. Eficacia.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los conteos de malas hierbas realizados tras las aplicaciones de los distintos tratamientos herbicidas y las valoraciones visuales de eficacia, en los tres años de ensayos.

Ensayo del año 2002

Las malas hierbas presentes en la campaña 2002 fueron las siguientes:

- Gramíneas:

. > 1 planta m⁻²: *Echinochloa crus-galli* y *Setaria pumila*.

. < 1 planta m⁻²: *Bromus* sp., *Hordeum* sp., *Cynodon dactylon* y *Setaria verticillata*.

- Dicotiledóneas:

. > 1 planta m⁻²: *Amaranthus blitoides*, *Anagallis arvensis*, *Chenopodium album*, *Diplotaxis eruroides* y *Sonchus oleraceus*.

. < 1 planta m⁻²: *Atriplex hastata*, *Capsella bursa-pastoris*, *Convolvulus arvensis*, *Conyza* sp., *Euphorbia* sp., *Heliotropium europaeum*, *Kickxia* sp., *Lactuca*, *Picris echioides*, *Polygonum aviculare*, *Portulaca oleracea*, *Rumex crispus*, *Sinapis arvensis*, *Solanum nigrum*, *Trifolium* sp., *Xanthium strumarium*.

- Ciperáceas:

. > 1 planta m⁻²: *Cyperus rotundus*.

Los tratamientos que incluyeron un herbicida aplicado en preemergencia (Tabla VII.13) controlaron de forma satisfactoria las malas hierbas gramíneas durante todo el periodo de cultivo. En cualquier caso, el número de gramíneas en el testigo sin tratar fue muy bajo este año (<5 plantas m⁻²). Los tratamientos de postemergencia no controlaron las gramíneas.

Tanto *Echinochloa crus-galli* como *Setaria pumilla* se presentaron a bajas densidades no observándose diferencias entre las dos especies en cuanto al control por los distintos tratamientos herbicidas (Tabla VII.14).

Los tratamientos en preemergencia con oxadiazón y pendimetalina consiguieron un buen control de las dicotiledóneas 6 semanas tras la siembra. Sin embargo, la clomazona se mostró menos eficaz en el control de las dicotiledóneas. Los tratamientos de postemergencia precoz redujeron de forma importante las dicotiledóneas. En cualquier caso, en la evaluación realizada tras el tratamiento de postemergencia precoz, el mejor control de las dicotiledóneas se observó en las parcelas tratadas con pendimetalina y oxadiazón en preemergencia y en las parcelas tratadas en postemergencia precoz con azimsulfurón (0,025) + cinosulfurón (0,08). Los tratamientos en postemergencia tardía fueron eficaces en el control de dicotiledóneas, reduciéndose su densidad en al menos siete veces respecto al testigo sin tratar. En cosecha se observó un control adecuado de las dicotiledóneas con casi todos los programas (entre el 70% y el 90% de control), exceptuando el programa 4 sin tratamiento de preemergencia y con cihalofop-butil (0,3 kg m.a. ha⁻¹) + bensulfurón (0,051 kg m.a. ha⁻¹) en postemergencia precoz y propanil (3,5 kg m.a. ha⁻¹) en postemergencia tardía.

Entre las malas hierbas dicotiledóneas destacó la presencia de *Anagallis arvensis* y en menor medida de *Sonchus oleraceus* (Tabla VII.14). El control de *A. arvensis* fue efectivo con los tratamientos de preemergencia en los que se empleó pendimetalina y oxadiazón, y algo menos aunque también significativamente distinto del testigo sin tratar con la clomazona sola. Esta mala hierba fue controlada por todos los tratamientos aplicados en postemergencia ex-

cepto por el propanil (3,5 kg m.a. ha⁻¹). *S. oleraceus* fue bien controlado por todos los tratamientos de preemergencia, pero sólo fue controlado en post-emergencia con profoxidim y con azimsulfurón + cinosulfurón. El tratamiento en postemergencia tardía con bentazona+MCPA redujo la densidad de *A. arvensis* pero no la de *S. oleraceus*.

Ninguno de los herbicidas aplicados en preemergencia controló *Cyperus rotundus*. Tras los tratamientos de postemergencia se observó que el tratamiento testigo sin herbicida tenía una densidad de *C. rotundus* menor que muchos tratamientos. Esto se debió a que en aquellos tratamientos en los que se controlaron las gramíneas y las dicotiledóneas, esta especie no sufrió la competencia de dichas malas hierbas.

Ensayo del año 2003

Las malas hierbas presentes en la campaña 2003 fueron las siguientes:

- Gramíneas:
 - . > 1 planta m⁻²: *Echinochloa crus-galli*.
 - . < 1 planta m⁻²: *Setaria pumila* y *Setaria verticillata*.
- Dicotiledóneas:
 - . > 1 planta m⁻²: *Amaranthus blitoides*, *Anagallis arvensis*, *Coronopus pro-cumbens* y *Sonchus oleraceus*.
 - . < 1 planta m⁻²: *Atriplex hastata**, *Capsella bursa-pastoris*, *Convolvulus arvensis*, *Datura stramonium**, *Diploaxis erucoides*, *Heliotropium europaeum*, *Kickxia sp.*, *Picris echioides**, *Polygonum aviculare*, *Polygonum persicaria**, *Portulaca oleracea*, *Chenopodium album**, *Rumex crispus**, *Senecio vulgaris*, *Solanum nigrum*, *Sonchus tenerrimus**, *Taraxacum sp.** y *Xanthium strumarium*.
- Ciperáceas:
 - . > 1 planta m⁻²: *Cyperus rotundus*.

La mayor densidad de gramíneas en 2003 puso de manifiesto diferencias de eficacia entre los tratamientos con herbicidas de preemergencia (Tabla VII.15). *E. crus-galli* fue la única especie gramínea presente a densidades de más de 1 planta m⁻² (Tabla VII.16). Se observó que el oxadiazón solo a una dosis de 0,5 kg ha⁻¹, y la pendimetalina sola a una dosis de 0,99 kg ha⁻¹, no fueron suficientemente eficaces, teniendo un control muy pobre de las gramíneas antes de cosecha. Los mejores resultados se obtuvieron en aquellos programas con pendimetalina a una dosis de 1,32 kg ha⁻¹, y con clomazona (0,36 kg ha⁻¹) sola o con pendimetalina (1,32 kg ha⁻¹) u oxadiazón (0,25 kg ha⁻¹). La

* Detectado sólo en la valoración visual de eficacia pero no en los conteos.

aplicación de propanil ($3,5 \text{ kg ha}^{-1}$) en postemergencia precoz logró controlar temporalmente las gramíneas pero dado su carácter de herbicida no residual, en la valoración final antes de la cosecha las parcelas con este tratamiento estaban infestadas de gramíneas (Tabla VII.15).

Respecto a las dicotiledóneas (Tabla VII.15), todos los tratamientos dieron lugar a un buen control, bien por la acción del herbicida de preemergencia o bien por la acción del herbicida aplicado en postemergencia. Todos los tratamientos que incluían un tratamiento en preemergencia controlaron totalmente *Amaranthus blitoides* y *A. arvensis*. En el caso de *S. oleraceus*, sólo la pendimetalina a la menor dosis ($0,99 \text{ kg ha}^{-1}$) no consiguió un control completo. Los tratamientos en postemergencia consiguieron controlar completamente las malas hierbas no controladas con el tratamiento de preemergencia (Tabla VII.16).

Como en el año anterior, las parcelas con un mejor control de gramíneas tras el tratamiento de preemergencia presentaron densidades de *C. rotundus* similares o mayores que el testigo sin tratar debido a la menor competencia de otras malas hierbas en las parcelas tratadas con herbicidas. La aplicación en postemergencia tardía de bentazona+MCPA ($1,6+0,24 \text{ kg ha}^{-1}$) logró un cierto control. Sin embargo, la aplicación de azimsulfurón a dosis de $0,020$ y $0,025 \text{ kg ha}^{-1}$ logró un buen control de esta especie (Tabla VII.15).

Ensayo del año 2004

En la campaña 2004 las malas hierbas presentes fueron:

- **Gramíneas:**

- . $> 1 \text{ planta m}^{-2}$: *Echinochloa crus-galli*.
- . $< 1 \text{ planta m}^{-2}$: *Paspalum paspalodes* y *Setaria pumila*.

- **Dicotiledóneas:**

- . $> 1 \text{ planta m}^{-2}$: *Atriplex hastata*, *Coronopus procumbens* y *Sonchus oleraceus*.
- . $< 1 \text{ planta m}^{-2}$: *Anagallis arvensis*, *Amaranthus blitoides*, *Chenopodium album*, *Convolvulus arvensis*, *Kickxia* sp., *Lotus corniculatus*, *Panicum milliaceum*, *Picris echioides*, *Polygonum aviculare*, *Portulaca oleracea*, *Potentilla reptans*, *Rumex crispus*, *Senecio vulgaris*, *Sinapis arvensis*, *Trifolium* sp. y *Xanthium strumarium*.

- **Ciperáceas:**

- . $> 1 \text{ planta m}^{-2}$: *Cyperus rotundus*.

Aunque los valores de eficacia en el control de gramíneas no fueron tan altos como en la campaña anterior, se consiguió un control adecuado con varios

programas herbicidas. Al igual que en 2003, *E. crus-galli* fue la única gramínea presente a densidades relevantes. El mejor control se obtuvo con los programas que tenían en preemergencia clomazona a dosis de $0,36 \text{ kg ha}^{-1}$, sola o con oxadiazón ($0,25 \text{ kg ha}^{-1}$) o pendimetalina. Cuando la clomazona estuvo mezclada con el oxadiazón no se observó diferencia en el control de gramíneas entre las dosis de clomazona de $0,36$ y $0,27 \text{ kg ha}^{-1}$. El tratamiento con pendimetalina sola, al igual que en la campaña 2003, no controló adecuadamente las gramíneas. Este control insuficiente ya ocurrió en 2003 aunque en menor medida. La aplicación de oxadiazón solo en preemergencia tan solo logró un control parcial de las gramíneas (Tabla VII.17).

Las malas hierbas dicotiledóneas fueron bien controladas por los tratamientos que incluyeron oxadiazón o pendimetalina en preemergencia. La clomazona aplicada en preemergencia logró un control parcial de las dicotiledóneas que disminuyó al disminuir la dosis. Se observó falta de control de *Atriplex hastata* con clomazona cuando este herbicida se aplicó solo. Si bien esta mala hierba fue controlada con clomazona a $0,36 \text{ kg ha}^{-1}$ a las seis semanas de la siembra, en la evaluación realizada tres semanas después se había perdido dicho control aun cuando se había aplicado además un tratamiento con bentazona+MCPA. El resto de malas hierbas dicotiledóneas fueron controlada por todos los programas herbicidas (Tablas VII.17 y VII.18).

La especie *C. rotundus* no fue controlada por los herbicidas aplicados en preemergencia. Tampoco fue controlada por la aplicación en postemergencia precoz con bentazona+MCPA. Sí resultó eficaz azimsulfurón a $0,020$ y $0,025 \text{ kg ha}^{-1}$ tanto en postemergencia precoz como en postemergencia tardía. Este segundo tratamiento de postemergencia tardía se realizó sobre las parcelas tratadas en postemergencia precoz con bentazona+MCPA debido a la falta de eficacia de dicho tratamiento. Como se puede observar en los resultados de eficacia tras los tratamientos de postemergencia tardía y la valoración final (9 semanas después), en general, hubo un descenso en el control en aquellos programas en que el azimsulfurón se aplicó en postemergencia precoz y no en postemergencia tardía (Tabla VII.17).

Tabla VII.13. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y *Cyperus rotundus* (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1) y tardía (POST2), valoración visual de la eficacia un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2002.

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)									Eficacia (%)			Rendimiento (t ha ⁻¹)	
#	PRE [2 STS] (Dosis)	POST1 [7 STS] y POST2 [10 STS] (Dosis)	PRE [6 STS]			POST1 [10 STS]			POST2 [12 STS]			Cosecha [19 STS]			
			GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	GRA	DIC		CYP
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	3 a	23 a	14 a	5 ab	37 a	18 b	4 a	35 a	55 ab	0 d	0 c	0 d	1,07 bc
2	Sin escarda	1: Azimsulfurón (0,025) + cinosulfurón (0,08)	-	-	-	2 abc	2 d	13 b	-	-	-	50 b	83 a	96 a	0,71 c
3	Sin escarda	1: Bensulfurón (0,051) + propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	-	-	5 ab	7 c	19 b	5 a	7 b	26 bc	33 bc	71 a	90 a	2,01 a
4	Sin escarda	1: Cihalofop-butil (0,3) + bensulfurón (0,051) 2: Propanil (3,5)	-	-	-	7 a	7 c	10 b	7 a	5 b	14 c	40 bc	48 b	94 a	1,58 ab
5	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	-	-	12 a	16 b	29 ab	13 a	2 b	47 abc	31 c	69 a	94 a	1,53 ab
6	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	0 b	9 b	32 a	1 bc	14 bc	57 a	1 a	5 b	85 a	89 a	79 a	61 b	1,54 ab
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	Sin escarda	0 b	0 c	13 a	0 c	0 d	34 ab	-	-	-	100 a	84 a	49 bc	1,65 ab
8	Oxadiazón (0,5)	1: Profoxidim (0,14)	1 b	0 c	28 a	0 c	1 d	48 a	-	-	-	99 a	89 a	33 c	1,50 ab
9	Pendimetalina (1,32)	Sin escarda	0 b	1 c	29 a	0 c	2 d	52 a	-	-	-	94 a	73 a	50 bc	2,04 a

No se realizó el conteo de malas hierbas en aquellos tratamientos en que no se aplicó herbicida, a excepción del testigo sin escarda. Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.14. Densidad de las principales malas hierbas (*Echinochloa crus-galli*, *Setaria pumila*, *Anagallis arvensis* y *Sonchus oleraceus*) en el ensayo de 2002, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1) y tardía (POST2).

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)												
#	PRE [2 STS] (Dosis)	POST1 [7 STS] y POST2 [10 STS] (Dosis)	<i>E. crus-galli</i>			<i>S. pumila</i>			<i>A. arvensis</i>			<i>S. oleraceus</i>		
			PRE	POST1	POST2	PRE	POST1	POST2	PRE	POST1	POST2	PRE	POST1	POST2
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	2 a	4 a	2 a	1 a	1 a	1 a	18 a	28 a	28 a	3 a	3 a	2 a
2	Sin escarda	1: Azimsulfurón (0,025) + cinsulfurón (0,08)	-	1 bc	-	-	1 a	-	-	0 c	-	-	0 c	-
3	Sin escarda	1: Bensulfurón (0,051) + propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	2 ab	3 a	-	2 a	1 a	-	4 c	4 b	-	3 a	2 a
4	Sin escarda	1: cihalofop-butil (0,3) + bensulfurón (0,051) 2: Propanil (3,5)	-	2 ab	3 a	-	5 a	4 a	-	0 c	1 b	-	3 a	1 a
5	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	-	3 ab	4 a	-	9 a	9 a	-	13 b	1 b	-	2 ab	2 a
6	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	0 b	0 c	0 a	0 a	1 a	0 a	9 b	12 b	3 b	0 b	1 bc	0 a
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	Sin escarda	0 b	0 c	-	0 a	0 a	-	0 c	0 c	-	0 b	0 c	-
8	Oxadiazón (0,5)	1: Profoxidim (0,14)	0 b	0 c	-	0 a	0 a	-	0 c	1 c	-	0 b	0 c	-
9	Pendimetalina (1,32)	Sin escarda	0 b	0 c	-	0 a	0 a	-	0 c	0 c	-	1 b	2 ab	-

No se realizó el conteo de malas hierbas en aquellos tratamientos en que no se aplicó herbicida, a excepción del testigo sin escarda. Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.15. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y *Cyperus rotundus* (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2), valoración visual de la eficacia un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2003.

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)						Eficacia (%)			Rendimiento (t ha ⁻¹)	
#	PRE [0 STS] (Dosis)	POST1 [2 STS] y POST2 [8 STS] (Dosis)	PRE [6 STS]			POST2 [10 STS]			Cosecha [19 STS]			
			GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	GRA	DIC		CYP
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	36 a	21 a	14 bc	49 a	20 a	5 ab	0 c	0 c	0 e	0,17 e
2	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	20 a	5 b	9 c	19 bc	0 b	9 ab	3 c	94 ab	-	0,32 de
3	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	0 c	1 cd	24 abc	0 d	1 b	1 ab	81 a	95 a	69 ab	6,06 a
4	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	2: Azimsulfurón (0,025)	0 c	0 d	27 ab	0 d	0 b	2 ab	91 a	93 ab	92 a	6,91 a
5	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	0 c	0 d	39 a	0 d	0 b	9 a	88 a	89 ab	10 de	2,23 cde
6	Oxadiazón (0,5)	2: Azimsulfurón (0,020)	13 bc	0 d	20 abc	29 ab	0 b	1 b	38 b	100 a	94 a	2,17 cde
7	Oxadiazón (0,5)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	3 bc	0 d	35 a	7 bcd	0 b	1 b	38 b	89 ab	49 bc	2,73 bc
8	Pendimetalina (0,99)	2: Clomazona (0,36) + propanil (1,75)	3 bc	3 bc	29 ab	6 bcd	0 b	7 ab	53 b	81 b	23 cde	2,62 cd
9	Pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	1 c	1 cd	32 a	2 cd	1 b	3 ab	76 a	88 ab	33 cd	5,03 ab

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.16. Densidad de las principales malas hierbas (*Echinochloa crus-galli*, *Amaranthus blitoides*, *Anagallis arvensis* y *Sonchus oleraceus*) en el ensayo de 2003, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia tardía (POST2).

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)			Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)							
#	PRE [0 STS] (Dosis)	POST1 [2 STS] y POST2 [8 STS] (Dosis)	<i>E. crus-galli</i>		<i>A. blitoides</i>		<i>A. arvensis</i>		<i>S. oleraceus</i>	
			PRE	POST2	PRE	POST2	PRE	POST2	PRE	POST2
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	34 a	48 a	1 a	1 a	3 a	10 a	12 a	8 a
2	Sin escarda	1: Propanil (3,5) 2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	20 ab	19 abc	0 a	0 a	0 b	0 a	4 b	0 b
3	Clomazona (0,36)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	0 c	0 d	0 a	0 a	0 b	0 a	1 c	0 b
4	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	2: Azimsulfurón (0,025)	0 c	0 d	0 a	0 a	0 b	0 a	0 c	0 b
5	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	0 c	0 d	0 a	0 a	0 b	0 a	0 c	0 b
6	Oxadiazón (0,5)	2: Azimsulfurón (0,020)	9 bc	28 ab	0 a	0 a	0 b	0 a	0 c	0 b
7	Oxadiazón (0,5)	2: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24)	3 c	7 bcd	0 a	0 a	0 b	0 a	0 c	0 b
8	Pendimetalina (0,99)	2: Clomazona (0,36) + propanil (1,75)	3 c	6 bcd	0 a	0 a	0 b	0 a	3 b	0 b
9	Pendimetalina (1,32)	2: Propanil (3,5)	1 c	1 cd	0 a	0 a	0 b	0 a	1 c	1 b

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.17. Densidad de malas hierbas gramíneas (GRA), dicotiledóneas (DIC) y *Cyperus rotundus* (CYP) tras los tratamientos de preemergencia (PRE) y postemergencia precoz (POST1), valoración visual de la eficacia tras los tratamientos de postemergencia tardía (POST2) y un mes antes de cosecha y rendimiento en grano (14% de humedad) en el ensayo de 2004.

#	Tratamientos m.a. ha ⁻¹)		Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)						Eficacia (%)						Rendimiento (t ha ⁻¹)
	PRE [1 STS] (Dosis)	POST1 [6 STS] y POST2 [9 STS] (Dosis)	PRE [6 STS]			POST1 [9 STS]			POST2 [11 STS]			Cosecha (20 STS)			
			GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	GRA	DIC	CYP	
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	43 a	15 a	190 a	38 a	15 a	322 ab	0 d	0 d	0 e	0 c	0 d	0 d	0,00 d
2	Clomazona (0,27)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	0 b	8 a	204 a	0 d	6 b	175 cd	94 a	51 c	73 bcd	76 a	67 c	66 abc	4,40 abc
3	Clomazona (0,36)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	3 b	2 b	266 a	3 cd	4 bc	322 ab	98 a	84 b	71 cd	80 a	81 abc	81 a	5,80 a
4	Clomazona (0,27) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,020)	0 b	0 b	223 a	0 d	0 c	122 d	94 a	98 ab	89 a	81 a	87 abc	62 abc	5,26 ab
5	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,025)	1 b	1 b	169 a	0 d	0 c	92 d	85 ab	95 ab	90 a	80 a	83 abc	58 bc	5,40 ab
6	Clomazona (0,36) + pendimetalina (0,66)	1: Azimsulfurón (0,025)	0 b	2 b	151 a	0 d	0 c	104 d	92 a	93 ab	85 abc	85 a	90 abc	67 abc	5,36 ab
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	1: Azimsulfurón (0,020)	0 b	2 b	182 a	1 cd	1 c	122 cd	88 a	96 ab	86 ab	70 ab	77 bc	50 c	3,98 abc
8	Oxadiazón (0,5)	1: Bentazona (2) + MCPA (0,3) 2: Azimsulfurón (0,020)	3 b	0 b	247 a	6 bc	0 c	389 a	68 bc	100 a	63 d	46 b	99 a	52 bc	2,55 c
9	Pendimetalina (1,32)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	6 b	1 b	184 a	10 b	0 c	224 bc	53 c	94 ab	65 d	40 b	91 ab	72 ab	3,13 bc

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

Tabla VII.18. Densidad de las principales malas hierbas (*Echinochloa crus-galli*, *Atriplex hastata*, *Coronopus procumbens* y *Sonchus oleraceus*) en el ensayo de 2004, tras los tratamientos de preemergencia (PRE), postemergencia precoz (POST1).

Tratamientos (kg m.a. ha ⁻¹)		Densidad de malas hierbas (n° m ⁻²)								
#	PRE [1 STS] (Dosis)	POST1 [6 STS] y POST2 [9 STS] (Dosis)	<i>E. crus-galli</i>		<i>A. hastata</i>		<i>C. procumbens</i>		<i>S. oleraceus</i>	
			PRE	POST1	PRE	POST1	PRE	POST1	PRE	POST1
1	Testigo sin escarda	Sin escarda	42 a	37 a	2 b	4 ab	2 ab	1 a	3 a	4 a
2	Clomazona (0,27)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	0 b	0 c	4 a	6 a	2 a	0 a	1 ab	0 b
3	Clomazona (0,36)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	1 b	1 c	1 bc	4 ab	1 abc	0 a	0 b	0 b
4	Clomazona (0,27) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,020)	0 b	0 c	0 c	0 b	0 c	0 a	0 b	0 b
5	Clomazona (0,36) + oxadiazón (0,25)	1: Azimsulfurón (0,025)	0 b	0 c	0 c	0 b	0 bc	0 a	0 b	0 b
6	Clomazona (0,36) + pendimetalina (0,66)	1: Azimsulfurón (0,025)	0 b	0 c	0 c	0 b	2 ab	0 a	0 b	0 b
7	Clomazona (0,36) + pendimetalina (1,32)	1: Azimsulfurón (0,020)	0 b	1 c	0 c	0 b	0 c	0 a	1 ab	0 b
8	Oxadiazón (0,5)	1: Bentazona (2) + MCPA (0,3) 2: Azimsulfurón (0,020)	2 b	4 c	0 c	0 b	0 c	0 a	0 b	0 b
9	Pendimetalina (1,32)	1: Bentazona (1,6) + MCPA (0,24) 2: Azimsulfurón (0,020)	6 b	9 b	0 c	0 b	0 c	0 a	1 b	0 b

Para cada columna, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$). STS: semanas tras siembra.

VII.3.3. Rendimiento en grano.

El rendimiento del arroz se puede ver afectado tanto por la falta de selectividad de los programas herbicidas como por la falta de eficacia del control de las malas hierbas que da lugar a una competencia de las mismas con el cultivo.

Se ha podido constatar una fuerte competencia de las malas hierbas con el arroz en riego por aspersión, de forma que los testigos sin escarda tuvieron rendimientos de $1,1 \text{ t ha}^{-1}$ en 2002 y prácticamente nulos en 2003 y 2004 (Tablas VII.13, VII.15 y VII.17). Esta fuerte competencia ha determinado que aquellos programas herbicidas que no han resultado eficaces hayan dado lugar a pérdidas de rendimiento debido a la competencia de las malas hierbas. En todas las campañas los mejores resultados se obtuvieron en aquellos programas que incluían un tratamiento de preemergencia que conseguía controlar el desarrollo de malas hierbas gramíneas. Esto queda de manifiesto en el análisis de regresión *stepwise* en el que sólo el control de malas hierbas gramíneas explicó el rendimiento del arroz todos los años (Tabla VII.19). Por otra parte, la fitotoxicidad en cosecha estuvo relacionada con el rendimiento en dos de los tres años de experimentación.

En la campaña de 2002, las bajas temperaturas en el momento de cuajado del grano afectaron al rendimiento en grano, obteniéndose rendimientos muy bajos, que fueron similares a los obtenidos en otros ensayos de esta tesis (Capítulos V y VI) y que estuvieron en consonancia con los obtenidos por los agricultores del valle medio del Ebro en cultivo tradicional de arroz inundado. A pesar de los bajos valores, se detectaron diferencias significativas entre tratamientos herbicidas (Tabla VII.13). Todos los tratamientos, excepto el que incluía azimsulfurón ($0,025 \text{ kg ha}^{-1}$) + cinosulfurón ($0,08 \text{ kg ha}^{-1}$) en postemergencia precoz, aumentaron el rendimiento (de un 40 a un 90%) respecto al testigo sin tratar, aunque solamente fue significativo el aumento en el caso del programa 3 con bensulfurón ($0,051 \text{ kg ha}^{-1}$) + propanil ($3,5 \text{ kg ha}^{-1}$) en postemergencia precoz y bentazona+MCPA ($1,6+0,24 \text{ kg ha}^{-1}$) en postemergencia tardía y el programa 9 con pendimetalina ($1,32 \text{ kg ha}^{-1}$) en preemergencia.

En 2003 (Tabla VII.15), los mayores rendimientos se obtuvieron con los programas 3 y 4 que consistían en la aplicación en preemergencia de clomazona a $0,36 \text{ kg ha}^{-1}$, sola o mezclada con oxadiazón a $0,25 \text{ kg ha}^{-1}$ y la aplicación en postemergencia de azimsulfurón a $0,020 \text{ kg ha}^{-1}$ o de bentazona+MCPA ($1,6+0,24 \text{ kg ha}^{-1}$). La aplicación de pendimetalina en preemergencia a $1,32 \text{ kg ha}^{-1}$ y propanil a $3,5 \text{ kg ha}^{-1}$ en postemergencia tardía también produjo rendimientos aceptables (5 t ha^{-1}). El resto de tratamientos produjo rendimientos inferiores a 3 t ha^{-1} debido a la falta de control de las gramíneas (programas 6, 7 y 8) o a un posible efecto fitotóxico (programa 5).

En la campaña de 2004 también se obtuvieron rendimientos significativamente mayores con los tratamientos que controlaron las gramíneas. Así, los mayores rendimientos se obtuvieron con la aplicación en preemergencia de clomazona a $0,36 \text{ kg ha}^{-1}$, sola o mezclada con oxadiazón a $0,25 \text{ kg ha}^{-1}$ o pendimetalina a $0,66 \text{ kg ha}^{-1}$. En el caso de la mezcla de clomazona con oxadiazón, el rendimiento no se vio afectado al reducir la dosis de clomazona a $0,27 \text{ kg ha}^{-1}$. En el caso de la mezcla de clomazona con pendimetalina, el menor rendimiento observado al aumentar la dosis de pendimetalina pudo deberse a un menor control de las gramíneas en la fase final del cultivo (Tabla VII.17), aunque no es descartable cierta fitotoxicidad pues dicho tratamiento también produjo un rendimiento bajo en 2003 pese a un buen control de las gramíneas dicho año. En los programas con un control aceptable de las gramíneas (2, 3, 4, 5 y 6) no se observaron diferencias significativas en el rendimiento entre los programas en que se aplicó azimsulfurón en postemergencia precoz o tardía para el control de *Cyperus rotundus*.

Tabla VII.19. Análisis de regresión entre el rendimiento en grano del arroz y el control de malas hierbas y la fitotoxicidad en cosecha.

Año	Modelo de regresión	R ²	Nivel de significación
2002	Rdto = $1.268 + 7,3 \cdot \text{ControlGRA} - 227 \cdot \text{FITOCose}$	0,31	ControlGRA: *; FITOCose: **
2003	Rdto = $-196 + 75,1 \cdot \text{ControlGRA} - 317 \cdot \text{FITOCose}$	0,82	ControlGRA: *; FITOCose: ***
2004	Rdto = $17,2 + 64,0 \cdot \text{ControlGRA}$	0,94	ControlGRA: ***

ControlGRA: control de gramíneas; FITOCose: fitotoxicidad en cosecha; Rdto, rendimiento.
Nivel de significación: *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

VII.4. DISCUSIÓN.

Durante el desarrollo de los ensayos de herbicidas en el arroz bajo riego por aspersión, las malas hierbas presentes más importantes han sido *Echinochloa crus-galli*, *Setaria pumila*, *Cyperus rotundus*, *Amaranthus blitoides*, *Anagallis arvensis*, *Atriplex hastata* y *Sonchus oleraceus*. Se han considerado tres grupos: por un lado todas las malas hierbas gramíneas, por otro las malas hierbas dicotiledóneas y, por último, y separado del resto, *Cyperus rotundus*, una mala hierba característica de las huertas antiguas y que no suele aparecer en los nuevos regadíos, por lo que no se prevé su presencia en campo en condiciones de siembra de arroz en este sistema.

Se ha podido constatar que el control adecuado de las malas hierbas constituye el aspecto clave para conseguir un rendimiento aceptable en arroz regado por aspersión. Esto ha sido puesto de manifiesto por algunos autores (Akkari *et al.*, 1986; Battilani y Petrosi, 1990), aunque quizás en nuestras condiciones esto es aún más importante. La fuerte competencia ejercida por las gramíneas y en particular por *E. crus-galli* hace que si no se consigue un

buen control de esta mala hierba desde el inicio del cultivo el rendimiento se vea fuertemente reducido, lo cual también sucede con siembra en seco y posterior inundación permanente (Jordan *et al.*, 1998b).

Los resultados obtenidos indican que el herbicida clomazona es el único que aplicado en preemergencia a lo largo de los tres años de ensayos ha dado lugar a un control aceptable de las gramíneas. En arroz inundado se ha constatado un buen control de las gramíneas con este herbicida en Arkansas (Webster y Baldwin, 1998; Talbert y Burgos, 2007) y en Louisiana (Jordan *et al.*, 1998a). La clomazona produjo síntomas de fitotoxicidad en las primeras fases de crecimiento del cultivo que posteriormente desaparecieron por lo que mostró una selectividad aceptable. Esto ha sido también puesto de manifiesto por diversos autores en arroz inundado (Webster *et al.*, 1999; Scherder *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004, 2005; Mudge *et al.*, 2005a) y en arroz "upland" (Esqueda, 2000), aunque algunos trabajos señalan que dosis altas provocan descensos en el rendimiento (Bollich *et al.*, 2000; Mudge *et al.*, 2005a). La moderada fitotoxicidad de la clomazona observada en el sistema de riego por aspersión concuerda con los resultados de Jordan *et al.* (1998a), que advirtieron una menor fitotoxicidad cuando la clomazona se aplica en arroz sembrado en seco, frente a la encontrada en arroz sembrado directamente en el terreno inundado. Mudge *et al.* (2005b) plantean que añadiendo benculfurón o halo-sulfurón a la clomazona los síntomas de blanqueamiento disminuyen sin disminuir la eficacia de la clomazona.

Zhang *et al.* (2004) y Mudge *et al.* (2005a) han encontrado diferencias varietales en cuanto a la selectividad de la clomazona en arroz. Así, en riego por inundación parece que las variedades de grano semilargo (como Guadiamar) y redondo son más sensibles a la clomazona. En nuestros ensayos se ha utilizado la variedad Guadiamar por ser la más sembrada en cultivo tradicional en el valle medio del Ebro. En el caso de utilizar otras variedades resultaría interesante hacer un ensayo previo de selectividad.

El oxadiazón se ha mostrado como un herbicida selectivo en arroz regado por aspersión cuando se aplica en preemergencia, aunque aplicado solo no controló adecuadamente las gramíneas. Sin embargo, aplicado en mezcla con clomazona mejoró el control de las dicotiledóneas. El buen control de dicotiledóneas por el oxadiazón ha sido puesto de manifiesto por Akkari *et al.* (1986) en arroz regado por aspersión, así como en arroz "upland" por Enyinnia (1992) y en arroz inundado por Smith y Khodayari (1985) y por Prasad y Rafeey (1995). A diferencia de lo encontrado en otros trabajos (Babiker, 1982; Smith y Khodayari, 1985), no se observó fitotoxicidad del oxadiazón aplicado en preemergencia sobre el arroz. En el trabajo de Smith y Khodayari (1985) el oxadiazón se aplicó en postemergencia y la fitotoxicidad fue pasajera pero en el de Babiker (1982), en el que se aplicó en preemergencia, el rendimiento del arroz se vio afectado.

La pendimetalina aplicada en preemergencia logró un buen control de las gramíneas a la dosis máxima ensayada ($1,32 \text{ kg ha}^{-1}$) tan solo uno de los años de ensayo. Cuando se mezcló con clomazona se obtuvo un mejor control de las gramíneas, pero la mezcla de pendimetalina a la mayor dosis pareció tener un efecto fitotóxico, también observado por Smith y Khodayari (1985) y por Street y Lanham (1996), ya que pese a ejercer un buen control de las malas hierbas, el rendimiento fue inferior al de otros tratamientos con similares niveles de control de las malas hierbas. Este efecto fitotóxico fue claro en el ensayo de 2004, en el que la mezcla con la menor dosis de pendimetalina produjo un mayor rendimiento que cuando se utilizó a la dosis más alta. Diversos trabajos han mostrado diferencias en la eficacia de la pendimetalina en función de la textura del suelo, así como su menor persistencia cuando no se incorpora en el suelo (Savage y Jordan, 1980; Zimdahl *et al.*, 1984). Aunque la pendimetalina es el herbicida que se recomienda en Italia en arroz regado por aspersión (Spanu y Murtas, 2002) y se ha indicado como eficaz en el control de las gramíneas en riego por inundación (Street y Lanham, 1996; Baltazar y Smith, 1994), en nuestras condiciones no ha resultado tan selectiva como la clomazona y el oxadiazón, por lo que resulta más interesante estudiar su aplicación a dosis más bajas en mezcla con la clomazona, ya que complementa su acción sobre las gramíneas y las dicotiledóneas.

Se ha constatado, al igual que en otros trabajos (Akkari *et al.*, 1986), que el control de la mala hierba perenne *Cyperus rotundus* es uno de los principales problemas de este sistema de cultivo. Esta especie no es una mala hierba común en los arrozales tradicionales al no soportar la inundación del terreno, por lo que existe poca información sobre el efecto que los herbicidas utilizados en arroz tienen sobre esta mala hierba. Sí aparece en aquellos sistemas de cultivo en los que se combinan periodos en que el suelo no está encharcado y periodos de inundación (Bhargavi y Reddy, 1992) como el arroz "upland" o el de siembra en seco. En nuestro trabajo se observó que infestaciones bajas de *C. rotundus* pueden ser controladas con la mezcla de bentazona+MCPA. Sin embargo, cuando la infestación de *C. rotundus* es importante, sólo el azimsulfurón controló adecuadamente esta mala hierba. Esto se ha observado los tres años de estudio en que en cosecha la bentazona+MCPA alcanzó una eficacia del 60-70%, mientras que el azimsulfurón superó el 90% de eficacia. En cuanto a la selectividad, este último herbicida causó menos daño en el arroz en estadios más avanzados, por lo que sería recomendable su aplicación en post-emergencia tardía. Habría que descartar su uso para el control de *E. crus-galli*, pues aunque está recomendado para el control de gramíneas en arroz bajo riego por inundación (Baltazar y Smith, 1994) no ha sido eficaz bajo riego por aspersión.

VII.5. CONCLUSIONES.

En los ensayos realizados se ha observado una fuerte competencia de las malas hierbas con el arroz, de forma que los testigos sin escarda tuvieron rendimientos inferiores a las $1,1 \text{ t ha}^{-1}$, e incluso nulos.

El control de malas hierbas gramíneas desde el momento de la siembra del arroz es imprescindible para su cultivo bajo riego por aspersión. En el caso de infestaciones de gramíneas, los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación de clomazona en preemergencia a $0,36 \text{ kg ha}^{-1}$, sola o mezclada con oxadiazón a $0,25 \text{ kg ha}^{-1}$ o con pendimetalina a $0,66 \text{ kg ha}^{-1}$. La aplicación de pendimetalina a $1,32 \text{ kg ha}^{-1}$ en preemergencia no controló las gramíneas en uno de los años, dando lugar a una disminución importante del rendimiento.

Las malas hierbas dicotiledóneas fueron adecuadamente controladas con la aplicación en preemergencia de oxadiazón a $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, solo o en mezcla con clomazona, y con la aplicación de bentazona+MCPA en postemergencia.

El control de *Cyperus rotundus* puede realizarse con bentazona+MCPA ($1,6+0,24 \text{ kg ha}^{-1}$) cuando la infestación sea baja y con azimsulfurón a $0,020 \text{ kg ha}^{-1}$ con infestaciones severas.

Los tratamientos en preemergencia con clomazona dieron lugar a una fitotoxicidad de la cual el cultivo se recuperó. La aplicación de pendimetalina a $1,32 \text{ kg ha}^{-1}$ en preemergencia no dio síntomas de fitotoxicidad en cosecha pero redujo el rendimiento del arroz.

La puesta a punto de sistemas de escarda en el arroz regado por aspersión requiere de más investigación en distintas áreas regables en las que se podría implantar, pues existen escasos trabajos en el mundo, y es de importancia decisiva para la viabilidad de esta modalidad de cultivo.

CAPÍTULO VIII.

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES FINALES

VIII.1. DISCUSIÓN GENERAL.

La creciente demanda de alimentos, debida al crecimiento de la población mundial, y la cada vez menor disponibilidad de agua para las actividades agrarias están haciendo necesario aumentar la productividad del agua utilizada en la agricultura. En el arroz este aumento puede lograrse actuando sobre el agua de riego, bien mediante la mejora de su manejo cuando se cultiva en terreno inundado o bien, como se plantea en esta tesis, mediante su cultivo bajo riego por aspersión.

Además, debido a la rentabilidad del cultivo del arroz, la superficie cultivada en España se ha incrementando en los últimos años (MAGRAMA, 2013), expandiéndose fuera de sus zonas tradicionales. Así, en algunas ocasiones el cultivo tradicional del arroz se ha efectuado en suelos de alta permeabilidad, llegando a determinarse valores de percolación profunda del orden de 800 mm, valor mayor que la que se produce en un típico suelo de arrozal (Playán *et al.*, 2008). Por otra parte, estas pérdidas por percolación profunda en el cultivo del arroz por inundación en suelos permeables podrían tener efectos medioambientales negativos, debido a las pérdidas por percolación profunda de agroquímicos.

En el desarrollo de esta tesis se ha podido constatar que la información científica existente en el ámbito internacional sobre el cultivo del arroz bajo riego por aspersión es reducida y los resultados muy dispares, probablemente debido a la interacción de factores edáficos, climáticos y biológicos (variedades de arroz seleccionadas a lo largo de siglos para condiciones de cultivo anaerobias, malas hierbas, plagas y enfermedades), existiendo algo de bibliografía en lo referente al denominado arroz aeróbico. La mayor parte de los escasos trabajos se han centrado en el estudio de la adaptación varietal y la respuesta al riego (Battilani y Pietrosi, 1991; Guiducci *et al.* 1999; Puckridge y O'Toole, 1981), existiendo más limitada información sobre las necesidades de fertilización y el control de malas hierbas. Los resultados obtenidos en esta tesis realizan una aportación relevante en estos aspectos, junto con los que se obtengan en estudios posteriores para completar los nuevos interrogantes que se plantean.

A lo largo de esta tesis, que ha abordado aspectos tan diversos como la adaptación de variedades, la dosis de agua necesaria para un correcto desarrollo del cultivo, los fertilizantes más adecuados y el control de malas hierbas, se ha confirmado que el cultivo del arroz bajo riego por aspersión es una técnica agronómica de gran interés, ya que por un lado permite una mayor productividad del agua de riego (de dos a cuatro veces, (Blackwell *et al.*, 1985)) y por otro lado reduce la percolación profunda en suelos permeables.

Es importante señalar de nuevo que el interés del cultivo del arroz bajo riego por aspersión no se plantea, al menos en España, como alternativa al

cultivo tradicional bajo riego por inundación, en suelos con capas cuasi impermeables, sino como una alternativa más en la rotación de cultivos en suelos de potencial agronómico elevado, que supone un uso más eficiente del agua de riego y una reducción importante de algunos costes (laboreo, recolección, fitosanitarios) (Spanu y Pruneddu, 1996). Esto supondría, que en años con restricciones en la dotación de agua de riego, la superficie cultivada de arroz no tendría que ser reducida drásticamente. Aunque el cultivo de arroz en España en 2014 ya no recibe subvenciones de la PAC, el IRRI (1993) ha indicado la necesidad de aumentar la producción de arroz en un 60% para el año 2020 y Tuong y Bouman (2003) señalan que para 2025 sufrirán escasez de agua entre 15 y 20 millones de hectáreas de arroz bajo riego por inundación. El cultivo con riego por aspersión permitiría atender esta demanda cuando se produzca.

En Aragón, este sistema de cultivo se comenzó en el año 2001 con los trabajos de la presente tesis doctoral. Los resultados han sido muy prometedores obteniéndose rendimientos del orden de 6-7 t ha⁻¹ con aplicaciones de agua de riego del orden de 800 mm pero con rendimientos nulos para aplicaciones de agua inferiores a 500 mm. Estos valores de riego coinciden con los obtenidos en ensayos realizados por Pérez-Coveta y Martínez-Cob (2002) para determinar la ET del arroz. También existe una información muy limitada sobre la ET del arroz en este sistema de riego y sobre dosis y frecuencia de riego. En experimentos realizados en lisímetros de pesada en Aragón indican que la ET del arroz bajo riego por aspersión fueron del orden de 750 mm, similar a la observada en un cultivo de arroz inundado situado a unos 70 km de distancia de Zaragoza y con una climatología muy parecida (Pérez-Coveta y Martínez-Cob, 2002). En Italia, Spanu y Pruneddu (1996) indican valores la ET del arroz del orden de 600 a 800 mm, y en Texas, McCauley (1990) estimó que la ET del arroz osciló entre 750 y 1.000 mm.

En general, se ha observado que cuando el arroz es cultivado bajo riego por aspersión la floración se retrasa (Dabney y Hoff, 1989; Muirhead *et al.*, 1989) y el periodo de floración a madurez se acorta (Spanu *et al.*, 1989). Este retraso en la floración puede aumentar la probabilidad de que se produzcan temperaturas nocturnas bajas impidiendo la correcta dehiscencia de las anteras y la formación de polen fértil, que provocan problemas de desarrollo y maduración del grano (Chaudhary *et al.*, 2003; Nahar *et al.*, 2009), dando lugar a una disminución del rendimiento (Muirhead *et al.*, 1989). Es debido a ello que las variedades de ciclo más corto (Ganao, Guadiamar y Guara) son las que tuvieron un rendimiento mayor en el área de estudio, al igual que se ha observado en algunas zonas de Italia (Guiducci *et al.*, 1999). En el Valle Medio del Ebro el arroz regado por inundación se siembra normalmente en mayo. Los ensayos realizados indican que dado que la floración del arroz se retrasa cuando se riega por aspersión, se tendría que plantear una siembra más temprana y así evitar las bajas temperaturas en el final del ciclo. El efecto de la fecha de

siembra debería ser estudiado en combinación con el varietal dadas las diferencias de ciclo entre las distintas variedades y teniendo en cuenta que las condiciones para el cultivo del arroz son mucho más limitantes en cuanto a ciclo en el Valle Medio del Ebro que en otros lugares de España, aunque con otras ventajas como la calidad del agua de riego y la mayor diferencia entre temperatura nocturna y diurna en el momento del llenado del grano que mejora su calidad.

La selección de variedades apropiadas resulta clave, junto con un adecuado control de malas hierbas, aspecto este último que ha resultado decisivo para el éxito del sistema de cultivo bajo riego por aspersión, condiciones también relevantes y reflejadas en la bibliografía referida al arroz aeróbico (Nie *et al.*, 2012). En el ensayo de comportamiento de variedades se encontró que existía una relación clara entre la precocidad y el rendimiento, de manera que las variedades de ciclo más corto eran las más productivas y las más adecuadas para su cultivo en las condiciones del Valle Medio del Ebro. Así las variedades más productivas fueron Ganao, Puebla, Loto y Thainato y las más precoces Loto, Lido, Guara, Guadiamar y Thainato. En cuanto al rendimiento industrial, los valores más altos se consiguieron en las variedades Guadiamar, Lido, Thainato y Guara. En vista de estos resultados obtenidos y del interés de los productores del Valle Medio del Ebro, las variedades elegidas para los ensayos agronómicos de respuesta al riego variable por aspersión fueron: Balilla x Sollana, Gladio, Guadiamar y Loto. Dado que la variedad Guadiamar es la preferida entre los arroceros de Aragón, por su buen rendimiento industrial que fue confirmado en el ensayo de variedades, se empleó esta variedad también en los ensayos de fertilización y control de malas hierbas. No obstante los resultados obtenidos, la selección de variedades adecuadas para el riego por aspersión en las condiciones del Valle Medio del Ebro requiere la realización de ensayos adicionales con las variedades comerciales y nuevas variedades que se están seleccionando en distintas partes del mundo para condiciones aerobias como Han Dai 502 y Han Dao 297 en China, Pusa Hybrid 10 y Proagro 6111 en India, B6144F-MR-6-0-0 en Laos y Apo, UPLRi5 y PSBRc80 en Filipinas (Bouman, 2008; Nie *et al.*, 2012).

Otro aspecto importante que se ha podido constatar es que cuando el arroz se riega por aspersión, le cuesta mucho tiempo cubrir el terreno. En ocasiones esto se debe en parte a un menor porcentaje de emergencia respecto al cultivo con riego por inundación (Blackwell *et al.*, 1985). Esto supone una menor interceptación de la radiación solar y un menor rendimiento (Boonjung y Fukai, 1996). Para futuros trabajos, sería de interés estudiar el efecto de la densidad de siembra en combinación con la fecha y la variedad, dado que un aumento de la densidad de siembra podría facilitar la competencia del cultivo con las malas hierbas.

En cuanto al manejo del riego, los resultados obtenidos están muy relacionados con la profundidad explorada por las raíces. Muchos estudios indican

que la mayor parte de las raíces se sitúan en los 20 cm superficiales del suelo y por ello el arroz bajo riego por aspersión necesita riegos frecuentes (Battiliani y Pietrosi, 1991; Blackwell *et al.*, 1985). Así, se ha constatado en la bibliografía que un intervalo de riego de 7 días en inicio de panícula puede causar pérdidas importantes de rendimiento (Blackwell *et al.*, 1985). Muirhead *et al.* (1989) observaron que la aplicación de la misma cantidad semanal de agua de riego dio lugar a un mayor rendimiento conforme mayor era el número de eventos de riego en que se repartía. Spanu y Pruneddu (1996) no encontraron diferencias de rendimiento entre regar con dosis de 20 o 30 mm, pero sí que observaron diferencias según los valores de Kc utilizados en las distintas fases de desarrollo del arroz para determinar las necesidades de riego. Dabney y Hoff (1989) observaron rendimientos similares cuando el riego se realizó cuando el potencial mátrico en los primeros 30 cm alcanzó -0,020 o -0,050 MPa, excepto en un año en que la demanda evaporativa fue muy alta, que se observó una mayor producción con -0,020 MPa. Battiliani y Pietrosi (1991) encontraron una disminución muy importante del rendimiento al aplicar dosis de agua de riego por debajo del 100% de la evapotranspiración máxima estimada a partir de la evaporación de un tanque clase A. En general, se recomiendan riegos frecuentes y de corta duración para mantener la humedad del suelo próxima a saturación, lo cual exige sistemas de riego por aspersión que permitan intervalos de riego de 2-3 días en las fases de necesidades máximas del arroz como se ha hecho en esta tesis, lo que puede ser limitante en algunos sistemas de riego por aspersión (Spanu y Pruneddu, 1999).

Boonjung y Fukai (1996) observaron que el estrés hídrico en plantas jóvenes afecta fundamentalmente al desarrollo de las raíces y de las hojas, lo cual conduce a una menor interceptación de radiación solar y a una menor producción de biomasa del arroz. En estadios más avanzados, el estrés hídrico reduce la eficiencia en el uso de la radiación. En el ensayo de respuesta al riego por aspersión del arroz se observó que el régimen de riego variable impuesto con la fuente lineal de aspersión produjo un importante efecto en el estado hídrico del suelo a lo largo del ciclo del cultivo en los diferentes tratamientos de riego. Los tratamientos más cercanos a la fuente lineal de aspersión (con mayor dosis de riego) mantuvieron unos niveles de humedad en el suelo mayores que los tratamientos menos regados y más alejados de la fuente lineal. Asimismo el riego diferencial produjo un importante efecto en la altura de la planta, fracción de PAR interceptado, rendimiento en grano, producción de biomasa aérea, número de panículas, peso de mil granos e índice de cosecha. Para todos estos parámetros productivos se encontró que existía una relación de tipo lineal con el agua aplicada en riego y precipitación. Cuanto mayor era la cantidad de agua aplicada en riego mayor era la variable considerada. Estas regresiones lineales tuvieron en todos los casos altos valores de los coeficientes de determinación. En los tres años de ensayos de riego, la regresión lineal entre rendimiento y agua aplicada de la variedad Guadamar estuvo por encima de las

demás variedades indicando que esta variedad fue la que tuvo un mejor comportamiento bajo riego por aspersión.

También existe limitada información sobre el efecto de los fertilizantes en el arroz cultivado con riego por aspersión dado que no es el sistema tradicional de cultivo. Wescott y Vines (1986) apuntan que la menor disponibilidad de nutrientes puede ser una de las causas del menor rendimiento cuando el riego del arroz se realiza por aspersión. Así, las recomendaciones de abonado para el arroz bajo inundación no pueden ser las mismas que en riego por aspersión, como señalan Zhang *et al.* (2009) para el arroz aeróbico.

En riego por aspersión las pérdidas de N por escorrentía superficial desaparecen y deberían ser menores las pérdidas por volatilización y desnitrificación. Sin embargo, las pérdidas de N por percolación por debajo de la zona de raíces pueden aumentar, dada la escasa profundidad de desarrollo de éstas y el aumento de la nitrificación, como se ha podido encontrar en el ensayo de fertilización, tanto de fertilización nitrogenada y fosfórica como de fraccionado de la fertilización nitrogenada. Ferguson y Gilmour (1979) observaron que cuando las dosis de N aplicado fueron altas, las pérdidas de N fueron similares en el riego por aspersión y en el riego por inundación. Awan *et al.* (2014) apuntan que no encontraron relación entre la aplicación de N y el N extraído por el cultivo, debido probablemente a las pérdidas significativas del fertilizante nitrogenado.

El fraccionamiento del N fertilizante, el tipo fertilizante y la aplicación de una dosis adecuada pueden limitar estas pérdidas. Wescott y Vines (1986) indican que la aplicación fraccionada del N incrementa los rendimientos del arroz bajo riego por aspersión y diversos autores recomiendan su fraccionamiento (Battilani y Pietrosi, 1990; Spanu y Pruneddu, 1997; Guiducci *et al.*, 1999; Awan *et al.*, 2014). Así, los resultados de esta tesis indican que el aporte del 50% del N en cobertera mejora el crecimiento del cultivo, aunque el rendimiento no se ha visto significativamente incrementado. Sería de interés estudiar el comportamiento del arroz cuando se aplican otros tipos de fertilizante y/o el fraccionado de dosis diferentes a la ensayada. Trabajos como el de Sathiya y Ramesh (2009) estudian distintas combinaciones de fraccionado del abono nitrogenado en el arroz aeróbico en 4 veces para incrementar el rendimiento, con la ventaja de minimizar las pérdidas del fertilizante. Da Silva y Stutte (1981) encontraron que la fertilización con $\text{NH}_4\text{-N}$ es preferible en las primeras etapas de crecimiento del arroz.

En cuanto a la dosis a aplicar, como se ha resaltado ya en el capítulo de fertilización, varía entre los 120 kg N ha^{-1} que aconsejan Aragon y De Datta (1982) y que produjeron los mayores rendimientos ($6,5\text{-}8,0 \text{ t ha}^{-1}$), y los 150 kg N ha^{-1} sugeridos por Spanu y Pruneddu (1997) para rendimientos de $8\text{-}10 \text{ t ha}^{-1}$. En los trabajos de esta tesis se ha observado una respuesta creciente a la dosis de N, con valores óptimos entre 150 y 200 kg N ha^{-1} , coincidentes, in-

cluso superiores a los de Spanu y Pruneddu (1997) aunque con rendimientos inferiores.

Dado que la mayoría de estudios se ha llevado a cabo en suelos de pH ácido, o básicos con alto contenido en P, el efecto de la fertilización fosfórica no se ha puesto de manifiesto, siendo ésta importante en el valle medio del Ebro, con suelos con pH básico y niveles bajos de P. Así, es de remarcar la importancia que tiene en suelos con bajo contenido inicial en el suelo (por debajo de 5 mg P Olsen kg⁻¹), pues con valores iniciales superiores 15 a mg P Olsen kg⁻¹, como se ha demostrado en este trabajo, no hay respuesta. El año con respuesta positiva, se consiguió un rendimiento superior a 6,5 t ha⁻¹ con la dosis de 150 kg P ha⁻¹.

En suelos calcáreos, Sonar y Ghugare (1982) y Savithri *et al.* (1999) indican una menor disponibilidad de Fe en condiciones no inundadas, lo que puede llevar a deficiencias de Fe cuando el arroz se cultiva sin el terreno permanentemente inundado, como también señalan Dobermann y Fairhurst (2000). Este problema parece más importante en las modernas variedades de arroz de talla corta porque su requerimiento de Fe es mayor. Este aspecto aún no ha sido estudiado en el cultivo de arroz bajo aspersión, pero puede ser importante en la zona del Valle del Ebro. Otro aspecto a considerar es el Mn, que trabajos recientes indican que su deficiencia podría estar detrás de los menores rendimientos del arroz en monocultivo (Bouman, 2008), aunque la rotación de cultivos que permite el riego por aspersión lo podría evitar.

El mantenimiento de una capa de agua en el cultivo de arroz bajo inundación evita la aparición de numerosas malas hierbas habituales en otros cultivos, pero favorece la aparición de especies acuáticas y semiacuáticas. El régimen de monocultivo del arroz inundado ha conllevado la selección de especies de malas hierbas bien adaptadas a las condiciones de cultivo, cuyo control resulta difícil y costoso, requiriendo un uso importante de productos herbicidas (Tiebas y Biurrún, 1995). En el caso del arroz regado por aspersión, las malas hierbas encontradas durante el desarrollo de esta tesis han sido las habituales en otros cultivos no inundados.

Se ha podido constatar que el control de las malas hierbas es la principal limitación del cultivo de arroz bajo aspersión (Blanco *et al.*, 2003), al igual que se ha visto en otros trabajos (Akkari *et al.*, 1986; Battilani y Petrosi, 1990). En los ensayos realizados en la presente tesis se ha observado una fuerte competencia de las malas hierbas con el arroz, de forma que los testigos sin escarda tuvieron rendimientos inferiores a las 2 t ha⁻¹ (Blanco *et al.*, 2003).

El arroz dispone de hasta 17 herbicidas³ autorizados en España (Liñán, 2013). Sin embargo, la información disponible sobre la selectividad y eficacia

³ azimsulfurón, bensulfurón metil, bentazona, bispiribac-sodio, cicloxidim, cihalofop-butil, cletodim, clomazona, halosulfuron-metil, imazamox, imazosulfuron, mcpa, molinato, oxadiazón, penoxsulam, profoxidim, propaquizafop.

de dichos herbicidas en el cultivo con riego por aspersión es escasa (Spanu *et al.*, 1992). Hay que tener en cuenta que muchos herbicidas utilizados en el cultivo tradicional de arroz con el terreno inundado basan su manejo en la existencia de una lámina de agua, requiriéndose, en ocasiones, que el agua cubra las plantas para evitar la fitotoxicidad. La eficacia de los herbicidas, es decir, su acción tóxica sobre las malas hierbas, se ve modificada bajo el régimen de riego frecuente por lavado de los productos de acción foliar o por percolación de los residuos en el suelo y por la modificación de la composición de las especies invasoras del arroz (Spanu y Pruneddu, 1998). Ferguson y Gilmore (1979) encontraron problemas de control de malas hierbas en arroz cultivado con riego por aspersión cuando el arroz se repitió varios años. Sin embargo, la rotación de cultivos que permite el riego por aspersión va a ser una característica muy favorable para el cultivo, evitando las infestaciones características del arroz con riego por inundación en monocultivo, como son *Echinochloa crus-galli* resistente al propanil o el arroz salvaje (*Oryza sativa*) (Catalá *et al.*, 2000).

En este trabajo se ha observado que los herbicidas clomazona, oxadiazón y pendimetalina aplicados en preemergencia pueden ser la base de un adecuado control de las malas hierbas anuales, pero los resultados han variado en los tres años de estudio, de forma que el oxadiazón requiere la mezcla con alguno de los otros dos herbicidas. La pendimetalina logró un buen control, pero pese a ser el herbicida que se recomienda en Italia (Spanu y Murtas, 2002), en nuestras condiciones no ha resultado tan selectiva como la clomazona y el oxadiazón, por lo que sería interesante estudiar su aplicación a dosis más bajas. La clomazona, registrada en España para su uso en arroz en 2003, ha obtenido buenos resultados también en arroz inundado en Arkansas (Webster y Baldwin, 1998) y en Louisiana (Jordan *et al.*, 1998a).

Se ha constatado, al igual que en otros trabajos (Akkari *et al.*, 1986), que el control de las malas hierbas perennes *Cyperus rotundus* y *Sorghum halepense* es uno de los principales problemas de este sistema de cultivo. Estas especies no son malas hierbas comunes en los arrozales tradicionales al no soportar la inundación del terreno. Se ha observado que la bentazona y el azimsulfurón son eficaces en el control de *Cyperus rotundus*, pero es necesario estudiar mejor las dosis y el momento de la aplicación. En cuanto al *Sorghum halepense*, no existe información sobre su control con los herbicidas autorizados en arroz, si bien las pruebas realizadas en el 2003 con el herbicida cihalofop-butilo son esperanzadoras.

La puesta a punto de sistemas de escarda en el arroz regado por aspersión es un tema clave y decisivo para el éxito de esta nueva técnica de cultivo y también es original, pues existen escasos trabajos en el mundo.

Ha habido pocos esfuerzos científicos en el ámbito nacional sobre la mejora del manejo del riego en el cultivo del arroz. En el ámbito internacional ha habido mayores esfuerzos, si bien el hecho de que el cultivo se realiza mayori-

tariamente en zonas tropicales de elevada pluviometría y con un nivel tecnológico bajo no ha priorizado la mejora del manejo del agua de riego en sus objetivos de investigación. Sin embargo, en las zonas de cultivo en las que el suministro hídrico al cultivo se realiza fundamentalmente mediante el riego, resulta prioritario la optimización de su manejo para conseguir aumentar su eficiencia.

El sector agrario se encuentra expectante por obtener respuestas a esas incógnitas a causa de la potencialidad del cultivo de arroz bajo aspersión en tierras de alto potencial agronómico y para poder incluir el arroz en sus alternativas de cultivos. Los resultados de esta tesis permitirán que los agricultores (cooperativas arroceras, comunidades de regantes) puedan contar con información detallada sobre la agronomía del cultivo del arroz bajo aspersión que les ayudará a tomar decisiones sobre la conveniencia de este tipo de cultivo en cada circunstancia particular. Aunque la extrapolación de los resultados a otras zonas españolas pueda necesitar de cierta experimentación en las mismas, aspectos como la fertilización y control de malas hierbas probablemente serán directamente extrapolables.

VIII.2. CONCLUSIONES FINALES.

Del análisis y discusión de los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados en la presente tesis, con el objetivo general de conocer la viabilidad del cultivo del arroz bajo riego por aspersión en las condiciones del Valle medio del Ebro, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Los resultados indican un efecto importante de la meteorología del año en el rendimiento de grano del arroz cuando se riega por aspersión.
2. Los riegos frecuentes y de corta duración aplicados en los ensayos han permitido mantener una humedad del suelo por encima de capacidad de campo. Esto se ha logrado con sistemas de riego por aspersión que permiten intervalos de riego de 2-3 días en las fases de necesidades máximas del arroz.
3. La nascencia y establecimiento del cultivo de arroz bajo riego por aspersión es en general muy lento y delicado. Es conveniente aumentar ligeramente la dosis de siembra respecto a la de riego por inundación.
4. Las variedades de ciclo más corto (Ganao, Puebla, Loto, Thainato y Guadamar) resultaron ser las más productivas, dando la mejor calidad del grano y los mejores rendimientos. Por el contrario, las variedades de ciclo más largo presentaron problemas para completar la maduración del grano y cubrir su ciclo vegetativo, dando como consecuencia peores rendimientos en grano.

5. La variedad Guadamar, ampliamente cultivada de forma tradicional en el Valle del Ebro tuvo el mayor valor de rendimiento industrial y un buen comportamiento productivo bajo riego por aspersión en relación al resto de las variedades estudiadas en el ensayo de variedades. Obtuvo también el mayor rendimiento productivo en el ensayo de dosis de riego, con rendimientos cercanos a 6.000 kg ha^{-1} , valores que se repitieron en los ensayos de fertilización y control de malas hierbas, en dos de los tres años de estudio. Este valor de la producción es similar a la producción media en la zona en sistemas de riego por inundación.
6. Es necesario continuar el estudio del comportamiento de distintas variedades de arroz en riego por aspersión en las condiciones agroclimáticas del Valle del Ebro, ya que estos resultados corresponden a un único año de ensayos.
7. Para el rango de valores del riego aplicado en los ensayos, se encontró una relación de tipo lineal entre la cantidad estacional de agua aplicada en riego y precipitación y la altura de la planta, la fracción de PAR interceptado, el rendimiento en grano, la producción de biomasa aérea, número de panículas, peso de mil granos, índice de cosecha y la productividad del agua aplicada.
8. Los valores máximos de producción de grano se obtuvieron con dosis de riego entre 700 y 900 mm. Aplicaciones inferiores a 500 mm no llegaron a producir rendimiento de grano.
9. Para obtener niveles aceptables de rendimiento de arroz bajo aspersión ($6\text{-}7 \text{ t ha}^{-1}$) se necesitan aplicaciones de N de 150 a $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$.
10. La respuesta positiva del arroz a la fertilización fosfórica se produce en suelos con bajos contenidos en fósforo como los del ensayo de 2003 ($<5 \text{ mg P Olsen kg}^{-1}$). Con niveles de P Olsen en el suelo de 15 mg kg^{-1} no se encontró respuesta.
11. El aporte del 50% del N en cobertera en inicio del ahijado mejora el crecimiento del cultivo. Aunque no se observaron diferencias significativas entre distintos tratamientos de fraccionado de N, los mayores rendimientos se obtuvieron con el fraccionamiento del N al 50% entre presiembra y ahijado, y los menores valores se obtuvieron cuando el N se aportó en tres veces.
12. Dado el sistema radicular tan superficial del cultivo de arroz, con el manejo estándar de una o dos aplicaciones de N es de esperar elevadas pérdidas de N del sistema por lavado de nitratos o niveles residuales elevados. Esto aumenta el riesgo de lavado en el periodo intercultivo si se producen lluvias importantes o si se riega en exceso. Sería interesante continuar el estudio de un mayor fraccionado del N, así como el uso de fertilizantes de liberación controlada y de cultivos cubierta.

13. La pérdida de N aumentó con la dosis de N fertilizante aplicado y fue considerable con dosis de N fertilizante superiores a 150 kg N ha⁻¹.
14. El control de las malas hierbas mediante la aplicación de tratamientos herbicidas es fundamental para la viabilidad del cultivo de arroz bajo aspersión.
15. El control de malas hierbas gramíneas desde el momento de la siembra del arroz es imprescindible para su cultivo bajo riego por aspersión. Algunos de los tratamientos herbicidas en preemergencia y postemergencia han resultado muy eficaces y son fundamentales para el éxito del cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación de clomazona en preemergencia a 0,36 kg ha⁻¹, sola o mezclada con oxadiazón a 0,25 kg ha⁻¹ o con pendimetalina a 0,66 kg ha⁻¹.
16. El control de malas hierbas dicotiledóneas se logró con la aplicación en preemergencia de oxadiazón a 0,5 kg ha⁻¹, solo o en mezcla con clomazona, y con la aplicación de bentazona+MCPA en postemergencia.
17. En definitiva, el cultivo del arroz bajo riego por aspersión es una técnica de producción viable y prometedora siempre que se elija una variedad adecuada a las condiciones climatológicas del lugar y se consiga mantener un control de las malas hierbas que evite su competencia con las plantas de arroz, especialmente en la fase de emergencia y establecimiento del cultivo.

CAPÍTULO IX.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA.

- Abedin Mian MJ, Blume HP, Bhuiya ZH, Equb M. 1991. Water and nutrient dynamics of a paddy soil of Bangladesh. *Z Pflanzenernähr Bodenk*, 154: 93-99.
- AfricaRice (Africa Rice Center). 2010. *New Breeding Directions at AfricaRice: Beyond NERICA*. Cotonou, Benin: 24 pp.
- Agostinetto D, Galon L, Moraes PVD, Tironi SP, Dal Magro T, Vignolo GK. 2007. Interferência de capim-arroz (*Echinochloa* spp.) na cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa*) em função da época de irrigação. *Planta Daninha*, 25: 689-696.
- Akkari KH, Talbert RE, Ferguson JA, Gilmour JT, Khodayari K. 1986. Herbicides and seeding rate effects on sprinkler-irrigated rice. *Agron J*, 78: 927-929.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 293 pp.
- Aragon EL, De Datta SK. 1982. Drought response of rice at different nitrogen levels using line source sprinkler system. *Irrig Sci*, 3: 63-73.
- Aulakh MS, Singh B. 1996. Nitrogen losses and fertilizer N use efficiency in irrigated porous soils. *Nutr Cycl Agroecosys*, 47: 197-212.
- Australian Weeds Committee. 1979. *Guidelines for field evaluation of herbicides*. Australian Government Publishing Service, Canberra. pp A1/1-4.
- Awan MI, Bastiaans L, van Oort P, Ahmad R, Ashraf MY, Meinke H. 2014. Nitrogen use and crop performance of rice under aerobic conditions in a semiarid subtropical environment. *Agron J*, 106: 199-211.
- Ayers RS, Westcot DW. 1985. *Water quality for agriculture*. FAO Irrig and Drain Paper, 29. Rev.1. 174 pp.
- Babiker AGT. 1982. Chemical weed control in irrigated direct-seeded rice in the Sudan Gezira. *Weed Res*, 22: 117-121.
- Baltazar AM, Smith RJ. 1994. Propanil-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) control in rice (*Oryza sativa*). *Weed Tech*, 8: 576-581.
- Batalla M. 1999. *Estudio del comportamiento agronómico de variedades de arroz con tratamientos hídricos diferenciados*. Informe interno, SIA, Junta de Extremadura.
- Battilani A, Pietrosi I. 1990. Effetti vegeto-produttivi del riso a tre regimi di irrigazione per aspersione. *L'Informatore Agrario*, 20: 63-66.
- Battilani A, Pietrosi I. 1991. Influenza del regime idrico sul comportamento vegeto-produttivo di due varietà di riso irrigate per aspersione. *L'Informatore Agrario*, 25: 41-46.
- Belder P, Bouman BAM, Spiertz JHJ, Guoan Lu, Quilang EJP. 2002. Water use of alternately submerged and nonsubmerged irrigated lowland rice. En:

- Bouman BAM, Hengsdijk H, Hardy B, Bindraban PS, Tuong TP, Ladha JK, editores. Water-wise rice production. Proceedings of the International Workshop on Water-wise Rice Production, 8-11 April 2002, Los Baños, Philippines. International Rice Research Institute. pp. 51-61.
- Berenguer MJ. 1996. Respuesta del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) a un suministro variable de riego en condiciones de campo y en ambientes controlados. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. 462 pp.
- Betrán Aso J. 2006. Referencias para la fertilización nitrogenada y razonamiento del aporte del resto de nutrientes. En: Andreu J, Betrán J, Delgado I, Espada JL, Gil M, Gutiérrez M, Iguácel F, Isla R, Muñoz F, Orús F, Pérez M, Quílez D, Sin E, Yagüe MR. Fertilización Nitrogenada: Guía de actualización. Informaciones técnicas/Centro de Transferencia Agroalimentaria, nº Extraordinario: 63-77.
- Bhargavi K, Reddy TY. 1992. Effect of different herbicides on population-dynamics and growth of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*) in semidry rice (*Oryza sativa*). Indian J Agric Sci, 62: 29-34.
- Blackwell J, Meyer WS, Smith RCG. 1985. Growth and yield of rice under sprinkler irrigation on a free-draining soil. Aust J Exp Agric, 25: 636-641.
- Blanco A, Pequerul A, Val J, Monge E, Gomez-Aparisi J. 1995. Crop-load effects on vegetative growth, mineral nutrient concentration and leaf water potential in 'Catherine' peach. Journal of Horticultural Science, 70: 623-629.
- Blanco O, Cavero J, Fernández-Cavada S, Zaragoza C. 2003. Ensayo de herbicidas en arroz cultivado con riego por aspersión. Actas Congreso 2003 de la Sociedad Española de Malherbología. Pp. 245-248.
- Boling A, Tuong TP, Singh AK, Wopereis MCS. 1998. Comparative Root Growth and Soil Water Extraction of Dry-Seeded, Wet-Seeded, and Transplanted Rice in a Greenhouse Experiment. Philippine J Crop Sci, 23: 45-52.
- Bollich PK, Jordan DL, Walker DM, Burns AB. 2000. Rice (*Oryza sativa*) response to the microencapsulated formulation of clomazone. Weed Tech, 14: 89-93.
- Boonjung H, Fukai S. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology biomass production and yield. Field Crops Res, 48: 47-55.
- Bouman BAM, Peng S, Castañeda AR, Visperas RM. 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. Agric Water Manage, 74: 87-105.
- Bouman BAM, Tuong TP. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. Agric Water Manage, 49: 11-30.
- Bouman BAM, Wang Hua Qi, Yang Xiao Guang, Zhao Jun Fang, Wang Chang Gui. 2002. Aerobic rice (Han Dao): a new way of growing rice in water-short areas. En: Proceedings of the 12th International Soil Conservation

- Organization Conference, 26-31 May, 2002, Beijing, China. Tsinghua University Press. pp. 175-181.
- Bouman BAM, Yang X, Wang H, Wang Z, Zhao J, Chen B. 2006. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. *Field Crops Res*, 97: 53-65.
- Bouman BAM. 2001. Water-efficient management strategies in rice production. *IRRN* 26.2: 17-22.
- Bouman BAM. 2008. CPWF Project Num.16: Developing a system of temperate and tropical aerobic rice in Asia (STAR). CGIAR Challenge Program on Water and Food Project Report Series; www.waterandfood.org. Disponible en: http://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/3928/PN16_IRRI_Project%20Report_Feb08_final.pdf?sequence=1 [último acceso: febrero 2014].
- Bozal JM, Santos A, Garnica J, Betelu F, Zúñiga J. 2002. Arroz: experimentación de variedades en la campaña 2001. *Navarra Agraria*, 131: 34-43.
- Bueno CS, Bucourt M, Kobayashi N, Inubushi K, Lafarge T. 2010. Water productivity of contrasting rice genotypes grown under water-saving conditions in the tropics and investigation of morphological traits for adaptation. *Agric Water Manage*, 98: 241-250.
- Cabangon RJ, Tuong TP, Castillo EG, Bao LX, Lu G, Wang GH, Cui YL, Bouman BAM, Li YH, Chen CD, Wang JZ. 2004. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy Water Environ*, 2: 195-206.
- Cai XL, Sharma BR. 2010. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic river basin. *Agric Water Manage*, 97: 309-316.
- Castellví F, Martínez-Cob A, Pérez-Coveta O. 2006. Estimating sensible and latent heat fluxes over rice using surface renewal. *Agric Forest Meteo*, 139: 164-169.
- Catalá MM, Llatser J, Torné L, López M. 2000. Control integrado del arroz salvaje en los arrozales del Delta del Ebro. *Phytoma-España* 115: 26-29.
- Cavero J, Zaragoza C, Cirujeda A, Anzalone A, Faci JM, Blanco O. 2011. Selectivity and weed control efficacy of some herbicides applied to sprinkler irrigated rice (*Oryza sativa* L.). *Spanish J Agric Res*, 9: 597-605.
- Chaudhary RC, Nanda JS, Tran DV. 2003. Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. COMISIÓN INTERNACIONAL DEL ARROZ. FAO, Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y2778s/y2778s04.htm> [Última consulta: abril 2014]
- Cho JY. 2003. Seasonal runoff estimation of N and P in a paddy field of central Korea. *Nutr Cycl Agroecosys*, 65: 43-52.

- Choudhury ATMA., Kennedy IR. 2005. Nitrogen Fertilizer Losses from Rice Soils and Control of Environmental Pollution Problems. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 36: 1625-1639.
- CII (Comité Inter-Institutos para el estudio de técnicas analíticas). 1969. Métodos de referencia para la determinación de elementos minerales en vegetales. *An. Edaf. Agrobiol.*, 38: 403-417.
- Coscolluela F, Faci JM. 1992. Obtención de la función de producción del maíz (*Zea mays* L.) respecto al agua mediante una fuente lineal de aspersion. *Invest Agr.: Prod. Prot. Veg*, 7: 169-194.
- Covay KJ, Sturrock AM, Sasser DC. 1992. Water requirements for growing rice in southwestern Louisiana, 1985-86. *Water Res Tech Rep 52*, Louisiana Department of Transportation and Development, Baton Rouge, LA, EE.UU.
- Crusciol CAC, Arf O, Soratto RP, Machado JR. 2003a. Extração de macronutrientes pelo arroz de terras altas sob diferentes níveis de irrigação por asperazo e de adubação. *Revista Brasileira Agrociência*, 9: 145-150.
- Crusciol CAC, Arf O, Soratto RP, Mateus GP. 2008. Grain quality of upland rice cultivars in response to cropping systems in the Brazilian tropical savanna. *Scientia Agricola*, 65: 468-473.
- Crusciol CAC, Arf O, Soratto RP, Rodrigues RAF, Machado JR. 2003b. Sprinkler irrigation management strategies as a function of "Kc" and mineral fertilization on upland rice crop. *Bragantia*, 62: 465-475.
- Da Silva PRF, Stutte CA. 1981. Nitrogen volatilization from rice leaves II. Effects of source of applied nitrogen in nutrient culture solution. *Crop Sci*, 21: 913-916.
- Dabney SM, Hoff BJ. 1989. Influence of water management on growth and yield of no-till planted rice. *Crop Sci*, 29: 746-752.
- Delta T Devices Ltd. 1996. *SunScan Canopy Analysis System User Manual*, v1.05. 86 pp.
- DGA. 2008. *Datos estadísticos agrarios de Aragón*. Diputación General de Aragón (DGA), Zaragoza, España.
- Diviner 2000 User Guide Version 1.2. 2000. Sentek, Pty Ltd. South Australia. 70 pp.
- Dobermann A, Fairhurst TH. 2000. *Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management*. Handbook Series. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute (IRRI). 191 p. Disponible en: http://dspace.irri.org:8080/dspace/bitstream/10269/250/2/9810427425_content.pdf [último acceso: abril 2012].
- Enyinnia T. 1992. Chemical weed-control in rain-fed upland rice in Nigeria. *Trop Pest Manage*, 38: 408-410.

- Esqueda VA. 2000. Control de malezas en arroz de temporal con clomazone, solo y en mezcla con propanil y 2,4-D. *Agronomía Mesoamericana*, 11: 51-56.
- Faci JM, Bercero A. 1991. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. *Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales*, 6: 171-182.
- Faci JM. 1986. Respuesta de los cultivos de sorgo y trigo a un suministro variables de agua de riego. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. 238pp.
- FAO. 2004. Año Internacional del Arroz. Todo sobre el arroz. Disponible en: <http://www.fao.org/rice2004/es/aboutrice.htm> [último acceso: abril de 2011].
- FAO. 2005. El futuro del arroz. *Revista Enfoques*. Dpto. Agricultura, Bioseguridad, Nutrición y Protección del Consumidor (AG) – FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0512sp2.htm> [último acceso: abril de 2011].
- FAO. 2014. Plant Production and Production Division: What are sustainable rice systems. Disponible en: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/scpi-home/managing-ecosystems/sustainable-rice-systems/rice-what/en/> [último acceso: febrero 2014].
- FAOSTAT data. 2012. Agriculture and Food Trade. Disponible en <http://faostat3.fao.org/home/index.html> [último acceso: marzo 2013].
- Farré I. 1998. Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) al riego deficitario. *Agronomía y modelización*. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. 150 pp.
- Ferguson JA, Gilmour JT. 1977. Center-Pivot Sprinkler Irrigation of Rice. *Arkansas Farm Res*, 26: 12-12.
- Ferguson JA, Gilmour JT. 1978. Water and nitrogen relations of sprinkler irrigated rice. *Arkansas Farm Res*, 27: 2.
- Finger R. 2007. Evidence of slowing yield growth – the example of swiss cereal yields. MPRA Paper 9475, University Library of Munich, Germany. 37 pp. Disponible en: http://mpra.ub.uni-muenchen.de/9475/1/MPRA_Evidence_of_slowing_yield_growth_a_the_example_of_Swiss_cereal_yields.pdf [último acceso: marzo 2012].
- Florez JA, Fischer AJ, Ramirez H, Duque MC. 1999. Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agron J*, 91: 87-92.
- Freney JR, Trevitt ACF, De Datta SK, Obcemea WN, Real JG. 1990. The interdependence of ammonia volatilization and denitrification as nitrogen loss processes in flooded rice fields in the Philippines. *Biol Fertil Soils*, 9: 31-36.
- George T, Magbanua R, Garrity DP, Tubaña BS, Quiton J. 2002. Rapid yield loss of rice cropped successively in aerobic soil. *Agron J*, 94: 981-989.

- Gitsopoulos TK, Froud-Williams RJ. 2004. Effects of oxadiargyl on direct-seeded rice and *Echinochloa crus-galli* under aerobic and anaerobic conditions. *Weed Res*, 44: 329-334.
- Guiducci M, Benincasa P, Rosati E, Bonciarelli U. 1999. Valutazione di varietà di riso irrigate per aspersione in Umbria. *L'Informatore Agrario*, 11: 67-70.
- Gupta PC, O'Toole JC. 1986. Upland rice. A Global Perspective. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines. 360 pp.
- Hamilton RW. 2004. The Art of Rice: Spirit and Sustenance in Asia. UCLA Fowler Museum of Cultural History. 552 pp.
- Hanks RJ, Keller J, Rasmussen VP, Wilson GD. 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation. *Crop production studies. Soil Sci Soc Am J*, 40: 426-429.
- Hanks RJ, Sisson DV, Hurst RL, Hubbard KG. 1980. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. *Soil Sci Soc Am J*, 44: 886-888.
- Hill JE, Smith RJ, Bayer DE. 1994. Rice weed control: current technology and emerging issues in temperate rice. *Aust J Exp Agric*, 34: 1021-1029.
- Horwitz W. 1980. Official methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C. pp. 298-299.
- HRAC. 2005. Classification of Herbicides according to Mode of Action. Disponible en: <http://www.hracglobal.com/Publications/ClassificationofHerbicideSiteofAction/tabid/222/Default.aspx> [último acceso: mayo 2011].
- IRRI. 1993. Rice research in a time of change. IRRI's medium-term plan for 1994-1998. IRRI, Los Baños, Filipinas.
- IRRI. 2003. Aerobic rice: preparing for a water crisis. En: *Rice Research: The Way Forward. Annual report 2000-2001*: 20-21. Disponible en: <http://www.irri.org//publications/annual/pdfs/AR2001/aerobicrice.pdf> [último acceso: noviembre 2003].
- Johnson DE, Chaudhuri UN, Kanemasu ET. 1983. Statistical analysis of line-source sprinkler irrigation experiments and other nonrandomized experiments using multivariate methods. *Soil Sci Soc Am J*, 47: 309-312.
- Jordan DL, Bollich PK, Burns AB, Walker DM. 1998a. Rice response to clomazone. *Weed Sci*, 46: 374-380.
- Jordan DL, Miller DK, Crawford SH. 1998b. Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) control in dry-seeded rice (*Oryza sativa*) with soil-applied and post-emergence herbicide programs. *Weed Tech*, 12: 69-73.
- Junta de Extremadura. 1999. Estudio del comportamiento agronómico de variedades de arroz con tratamientos hídricos diferenciados. Ensayo de arroz 1998. La Orden (Badajoz).

- Kahlow N MA, Raouf A, Zubair M, Kemper WD. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agric Water Manage*, 87: 292-298.
- Kundu DK, Ladha JK. 1999. Sustaining productivity of lowland rice soils: issues and options related to N availability. *Nutr Cycl Agroecosys*, 53: 19-33.
- Lafitte HR, Bennett J, Tuong TP. 2006a. Preparing rice for a water-limited future: From molecular to regional scale. *Field Crops Res*, 97: 1-2.
- Lafitte HR, Courtois B, Arrau deau M. 2002. Genetic improvement of rice in aerobic systems: progress from yield to genes. *Field Crops Res*, 75: 171-190.
- Lafitte HR, Li ZK, Vijayakumar CHM, Gao YM, Shi Y, Xu JL, Fu BY, Ali AJ, Domingo J, Maghirang R, Torres R, Mackill D. 2006b. Improvement of rice drought tolerance through backcross breeding: Evaluation of donors and selection in drought nurseries. *Field Crops Res*, 97: 77-86.
- Li H, Liang XQ, Chen YX, Tian GM, Zhang ZJ. 2008. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management. *Agric Water Manage*, 95: 887-894.
- Liñán C. 2005. *Vademécum de productos fitosanitarios y nutricionales*. Eds. Agrotécnicas, S.L. Madrid. 671 pp.
- Liñán C. 2013. *Vademécum de productos fitosanitarios y nutricionales*. Eds. Agrotécnicas, S.L. Madrid. 816 pp.
- López Bellido L. 1991. *Cereales*. Madrid, Ed. Mundi-Prensa. 593 pp.
- López Ritas J, López Melida J. 1978. *El diagnóstico de suelos y plantas: métodos de campo y laboratorio*. Mundi-Prensa. 3a. ed. 337 p.
- Maas EV, Hoffman GJ. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J Irrig Drain Div, Am. Soc Civil Engin*, 103: 115-134.
- Macleán JL, Dawe DC, Hardy B, Hettel GP (editores). 2002. *Rice Almanac*, 3rd edition. Los Baños (Philippines): IRRI, Bouaké (Côte d'Ivoire): WARDA, Cali (Colombia): CIAT, Rome (Italy): FAO. pp. 253.
- MAGRAMA. 2013. Evolución de la superficie y producción de arroz en España - Campañas 2002/03 - 2011/12. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/Evoluci%C3%B3n_Sup%2C_Prod%2C_ARROZ_Espa%C3%B1a_tcm7-183156.pdf [último acceso: enero 2014]
- MAPA. 1994. *Métodos oficiales de análisis*. Vol. III: Suelos y aguas. MAPA. Madrid, 662 p.
- MAPA. 2005. *Registro de productos fitosanitarios*. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/fitos.asp> [último acceso: enero 2013].
- MARM. 2010. *Anuario de Estadística 2009*. Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), Subdirección

- General de Estadística. Madrid, 1147 pp. Disponible en: <http://www.marm.es/es/estadistica/temas/anuario-de-estadistica/default.aspx> [último acceso: abril 2011]
- Martin JH, Leonard WH, Stamp DL. 1976. Principles of field crop production. Macmillan Publishing Co., Inc., New Cork. 1118 pp.
- Martínez Eixarch MT. 2010. Caracterización y optimización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro. [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. 296 pp. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/8955> [último acceso: mayo 2014]
- Martínez Gómez RB. 2002. Estudio del comportamiento agronómico de variedades de arroz con riego por aspersión. EUPLA - Universidad de Zaragoza. 75 pp.
- Martínez-Cob A, Pérez-Coveta O. 2006. Evapotranspiración del cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Ingeniería del Agua, 13: 59-69.
- Mata AP, Val J, Blanco A. 2006. Prohexadione-Calcium effects on the quality of 'Royal Gala' apple fruits. J Hort Sci and Biotech, 81: 965-970.
- McCauley GN. 1990. Sprinkler vs. flood irrigation in traditional rice production regions of southern Texas. Agron J, 82: 677-683.
- Minzoni F, Bonetto C, Golterman HL. 1988. The nitrogen cycle in shallow water sediment systems of rice fields. Part 1: The denitrification process. Hydrobiol, 159: 189-202.
- Mishra HS, Rathore TR, Pant RC. 1990. Effect of intermittent irrigation on groundwater table contribution. Irrigation requirement and yield of rice in Mollisols of the Tarai Region. Agric Water Manage, 18: 231-241.
- Mudge CR, Webster EP, Leon CT, Zhang W. 2005a. Rice (*Oryza sativa*) cultivar tolerance to clomazone in water-seeded production. Weed Tech, 19: 907-911.
- Mudge CR, Webster EP, Zhang W, Leon CT. 2005b. Rice (*Oryza sativa*) response to clomazone plus bensulfuron and halosulfuron. Weed Tech, 19: 879-884.
- Muirhead WA, Blackwell J, Humphreys E, White RJG. 1989. The growth and nitrogen economy of rice under sprinkler and flood irrigation in South East Australia. I. Crop response and N uptake. Irrig Sci, 10: 183-199.
- Nahar K, Biswas JK, Shamsuzzaman AMM, Hasanuzzaman M, Barman HN. 2009. Screening of Indica Rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes Against Low Temperature Stress. Bot Res Intl, 2: 295-303.
- Nie LX, Peng SB, Chen MX, Shah F, Huang JL, Cui KH, Xiang J. 2012. Aerobic rice for water-saving agriculture. A review. Agron Sustain Dev, 32: 411-418.
- Okafor LI, De Datta SK. 1976. Chemical control of perennial nutsedge (*Cyperus rotundus* L.) in tropical upland rice. Weed Res, 16: 1-5.

- Oosterhuis DM. 1978. Nitrogen Studies on Rice Grown under Sprinkler Irrigation in Southeastern Low-Veld of Rhodesia. *Rhodesia Agric J*, 75: 5-10.
- Peng S, Huang J, Sheehy JE, Laza RC, Visperas RM, Zhong X, Centeno GS, Khush GS, Cassman KG. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101: 9971-9975.
- Pérez-Coveta O, Martínez-Cob A. 2002. Determinación de la evapotranspiración del arroz bajo dos sistemas de riego. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real, 12-14 junio de 2002. pp 19-22.
- Pinheiro BdS, Castro EdM, Guimarães CM. 2006. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. *Field Crops Res*, 97: 34-42.
- Playán E, Perez-Coveta O, Martínez-Cob A, Herrero J, García-Navarro P, Latorre B, Brufau P, Garcés J. 2008. Overland water and salt flows in a set of rice paddies. *Agric Water Manage*, 95: 645-658.
- Prasad K, Rafey A. 1995. Effect of integrated weed management on weed growth, nutrient-uptake, economics and energetics in rain-fed upland rice (*Oryza sativa*). *Indian J Agric Sci*, 65: 260-264.
- Puckridge DW, O'Toole KC. 1981. Dry matter and grain production of rice using a line source sprinkler in drought studies. *Field Crops Res*, 3: 303-319.
- Puicercús JA, Valero A, Navarro J, Terrén R, Zubiaur R, Martín F, Iniesta G. 1994. Atlas eólico de Aragón. Diputación General de Aragón, Departamento de Industria, Comercio y Turismo. 127 pp.
- Rao AN, Johnson DE, Sivaprasad B, Ladha JK, Mortimer AM. 2007. Weed management in direct-seeded rice. *Adv Agron*, 91: 153-255.
- Rawls WJ, Brakensiek DL. 1989. Estimation of soil retention and hydraulic properties. En: Morel-Seytoux HJ (ed.). *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, pp: 275-300.
- Rehman HU, Basra SMA, Wahid A. 2013. Optimizing nitrogen-split application time to improve dry matter accumulation and yield in dry direct seeded rice. *Int J Agric Biol*: 15: 41-47
- Reis MA dos, Arf O, da Silva MG, de Sá ME, Buzetti S. 2008. Aplicação de silício em arroz de terras altas irrigado por aspersão. *Acta Sci Agron*, 30: 37-43.
- Rowe RN, Johnson R. 1992. The interactions between fruit number, tree size and the yield and fruit size of 'Fantasia' nectarine. *Acta Horticulturae*, 315: 171-176.
- Salmerón M, Cavero J, Quílez D, Isla R. 2010. Winter cover crops affect monoculture maize yield and N leaching under irrigated Mediterranean conditions. *Agron J*, 102: 1700-1709.

- Salmerón M, Isla R, Cavero J. 2011. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Res*, 123: 89-99.
- Salvador R, Martínez-Cob A, Cavero J, Playan E. 2011. Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation systems. *Agric Water Manage*, 98: 577-587.
- Sandhu BS, Khera KL, Prihar SS, Singh B. 1980. Irrigation needs and yield of rice on a sandy-loam soil as affected by continuous and intermittent submergence. *Indian J Agric Sci*, 50: 492-496.
- Sathiya K, Ramesh T. 2009. Effect of split application of nitrogen on growth and yield of aerobic rice. *Asian J Exp Sci*, 23: 303-306.
- Savage KE, Jordan TE. 1980. Persistence of three dinitroaniline herbicides on the soil surface. *Weed Sci*, 28: 105-110.
- Savithri P, Perumal R, Nagarajan R. 1999. Soil and crop management technologies for enhancing rice production under micronutrient constraints. *Nutr Cycl Agroecosys*, 53: 83-92.
- Scherder EF, Talbert RE, Clark SD. 2004. Rice (*Oryza sativa*) cultivar tolerance to clomazone. *Weed Tech*, 18: 140-144.
- Shah SB, Edling RJ. 2000. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. *J Irrig and Drain Engin*, 126: 8-13.
- Shi Q, Zeng X, Li M, Tan X, Xu F. 2002. Effects of different water management practices on rice growth. En: Bouman BAM, Hengsdijk H, Hardy B, Brindaban PS, Tuong TP, Ladha JK (eds). *Water-wise Rice Production. Proceedings of the International Workshop on Water-wise Rice Production, 8-11 April, Los Baños (Filipinas)*. IRRI. pp. 3-13.
- Slaton NA, Linscombe SD, Norman RJ, Gbur EE. 2003. Seeding date effect on rice grain yields in Arkansas and Louisiana. *Agron J*, 95: 218-223.
- Slaton NA, Wilson CE, Norman RJ, Ntamatungiro S, Frizzell DL. 2002. Rice response to phosphorus fertilizer application rate and timing on alkaline soils in Arkansas. *Agron J*, 94 1393-1399.
- Smith RJ, Khodayari K. 1985. Herbicide treatments for control of weeds in dry-seeded rice (*Oryza sativa*). *Weed Sci*, 33: 686-692.
- Smith RJ. 1988. Weed thresholds in Southern U.S. rice, *Oryza sativa*. *Weed Tech*, 2: 232-241.
- Soil Survey Staff (SSS). 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. SMSS Technical Monograph No. 19. 5th Edition. Pocahontas Press, Inc. Blacksburg, VA., 541pp.
- Sonar KR, Ghugare RV. 1982. Release of Fe, Mn and P in a calcareous vertisol and yield of upland rice as influenced by presowing soil water treatments. *Plant and Soil*, 68: 11-18.
- Spanu A, Murtas A, Ledda L, Ballone F. 2004. Root system development in flooded and sprinkler irrigated rice cultivars. En: Ferrero A, Vidotto F

- (eds). Proceedings of the Conference "Challenges and Opportunities for Sustainable Rice-Based Production Systems". Turín, Italia, 13-15 de septiembre de 2004. pp. 217-225.
- Spanu A, Murtas A. 2002. Coltivazione del riso con irrigazione per aspersione. L'Informatore Agrario, 7: 33-36.
- Spanu A, Pruneddu G, Cabras P, Melis M, Spanedda L. 1992. Persistence and mobility in clay soil of different herbicides in sprinkler-irrigated rice. Agricoltura Mediterranea, 122: 287-292.
- Spanu A, Pruneddu G, Deidda M. 1989. Primi risultati sulla coltivazione del riso (*Oryza sativa* L.) irrigato per aspersione. Revista di agronomia, 23: 378-384.
- Spanu A, Pruneddu G. 1996. The influence of irrigation volumes on sprinkler-irrigated rice (*Oryza sativa* L.) production. Agricoltura Mediterranea, 126: 377-382.
- Spanu A, Pruneddu G. 1997. Effect of increasing nitrogen rates on the yield of sprinkler-irrigated rice (*Oryza sativa* L.). Agricoltura Mediterranea, 127: 379-387.
- Spanu A, Pruneddu G. 1998. Riso irrigate per aspersione: nuove cultivar a confronto. L'Informatore Agrario, 13: 64-66.
- Spanu A, Pruneddu G. 1999. Nuove varietà di riso irrigate per aspersione. L'Informatore Agrario, 11: 61-63.
- Spanu A, Pruneddu G. 2000. Riso irrigato per aspersione. L'Informatore Agrario, Supplemento 9: 39-41.
- Street JE, Lanham DJ. 1996. Pendimethalin as a delayed preemergence herbicide in rice. Mississippi Agric Forestry Exp Station Res. Bulletin, 1064. Disponible en: <http://msucares.com/pubs/bulletins/b1064.htm> [último acceso: mayo 2011].
- Talbert RE, Burgos NR. 2007. History and management of herbicide-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in Arkansas rice. Weed Tech, 21: 324-331.
- Thompson JA. 2002. Water management of rice in southern New South Wales, Australia. En: Bouman BAM, Hengsdijk H, Hardy B, Brindaban PS, Tuong TP, Ladha JK (eds). Water-wise Rice Production. Proceedings of the International Workshop on Water-wise Rice Production, 8-11 April 2002, Los Baños (Filipinas): IRRI. pp. 63-67.
- Tiebas A, Biurrun R. 1995. Problemas fitosanitarios del arroz. Navarra Agraria. Mayo-junio. pp: 13-14.
- Tinarelli A. 1989. El arroz. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 575 pp.
- Tuong TP, Bhuiyan SI. 1999. Increasing water-use efficiency in rice production: farm-level perspectives. Agric Water Manage, 40: 117-122.

- Tuong TP, Bouman BAM. 2003. Rice production in water-scarce environments. In: Kijne JW, Barker R, Molden D (Eds.), Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. UK: CABI Publishing. p 53-67.
- Tuong TP, Wopereis MCS, Marquez JA, Kropff MJ. 1994. Mechanisms and control of percolation losses in irrigated puddled rice fields. *Soil Sci Soc Am J*, 58: 1794-1803.
- UNCTAD. 2006. Información sobre el arroz. Disponible en: <http://www.unctad.org/infocomm/espagnol/arroz/calidad.htm> [último acceso: abril de 2011].
- WARDA. 2001. New Rice for Africa: NERICA—Rice for Life. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire. 8 p. ISBN 92 9113 217 9.
- Watermark. Manual de instrucciones. IRROMETER CO., Riverside, California.
- Webster EP, Baldwin FL, Dillon TL. 1999. The potential for clomazone use in rice (*Oryza sativa*). *Weed Tech*, 13: 390-393.
- Webster EP, Baldwin FL. 1998. Clomazone use in rice. Research Series. *Arkansas Agric Exp Stat*, 460: 91-94.
- Weerakoon WMW, Ingram KT, Moss DN. 2000. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. *Plant and Soil*, 220: 99-106.
- Westcott MP, Vines KW. 1986. A comparison of sprinkler and flood irrigation for rice. *Agron J*, 78: 637-640.
- Zeng L, Lesch SM, Grieve CM. 2003. Rice growth and yield respond to changes in water depth and salinity stress. *Agric Water Manage*, 59: 67-75.
- Zeng L, Shannon MC. 2000. Effects of salinity on grain yield and yield components of rice at different seeding densities. *Agron J*, 92: 418-423.
- Zhang L, Lin S, Bouman BAM, Xue C, Wei F, Tao H, Yang X, Wang H, Zhao D, Dittert K. 2009. Response of aerobic rice growth and grain yield to N fertilizer at two contrasting sites near Beijing, China. *Field Crops Res*, 114: 45-53.
- Zhang W, Webster EP, Blouin DC, Linscombe SD. 2004. Differential tolerance of rice (*Oryza sativa*) varieties to clomazone. *Weed Tech*, 18: 73-76.
- Zhang W, Webster EP, Blouin DC. 2005. Response of rice and barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to rates and timings of clomazone. *Weed Tech*, 19: 528-531.
- Zimdahl RL, Catizone P, Butcher AC. 1984. Degradation of pendimethalin in soil. *Weed Sci*, 32: 408-412.
- Zwart SJ, Bastiaansen WGM. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric Water Manage*, 69: 115-133.

ANEJO. LISTA DE ABREVIATURAS

α :	nivel de significación	mín:	mínima
a:	clase textural arcillosa	MO:	materia orgánica
ANOVA:	análisis de varianza	N:	Nitrógeno
Ar:	clase textural arenosa	N _C :	N extraído por el cultivo
CC:	capacidad de campo	N _F :	N aportado en la fertilización
CE _a :	conductividad eléctrica del agua de riego	N _R :	masa de N en el riego
CE _e :	conductividad eléctrica del extracto del suelo	N _{S_FIN} :	N inorgánico en el suelo en postcosecha
CO ₃ Ca:	carbonato cálcico	N _{S_INI} :	N inorgánico en el suelo en presiembra
ControlCYP:	control de ciperáceas	NH ₄ :	amonio
ControlDIC:	control de dicotiledóneas	NO ₃ ⁻ :	nitrato
ControlGRA:	control de gramíneas	Ópt:	rango óptimo
CV:	coeficiente de variación	P:	fósforo
CYP:	<i>Cyperus rotundus</i>	ρ :	probabilidad de estar por debajo del nivel de significación
Def.:	deficiencia	PHL:	peso hectolitro
DIC:	dicotiledóneas	PMG:	peso de mil granos
ET:	Evapotranspiración	PMP:	punto de marchitez permanente
ET ₀ :	Evapotranspiración de referencia	POST1:	postemergencia precoz
ET _c :	Evapotranspiración del cultivo	POST2:	postemergencia tardía
F:	clase textural franca	Pr:	precipitación
FITO:	fitotoxicidad	PRE:	preemergencia
FITOCosecha:	fitotoxicidad en cosecha	Prof.:	profundidad
GRA:	gramíneas	S:	efecto significativo
h:	altura	SAR:	relación de adsorción de sodio
HR:	humedad relativa	STS:	semanas tras siembra
IC:	Índice de cosecha	T ^a :	temperatura
IPAR:	radiación fotosintéticamente activa interceptada	V:	velocidad
K:	potasio		
L:	clase textural limosa		
máx:	máxima		
med:	media		
Mg:	magnesio		