



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

# CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL AHIJADO DEL ARROZ EN EL DELTA DEL EBRO

**M<sup>a</sup> Teresa Martínez Eixarch**



Tesis Doctoral dirigida por:

Dr. Zhu Defeng

Dr. José M<sup>a</sup> Osca Lluch

Septiembre 2010





UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

# **CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL AHIJADO DEL ARROZ EN EL DELTA DEL EBRO**

Tesis Doctoral de **M<sup>a</sup> Teresa Martínez Eixarch** para optar al título de doctora  
en Producción Vegetal

Directores de la Tesis:

Dr. Zhu Defeng

Dr. José M<sup>a</sup> Osca Lluch

Programa de doctorado de Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

Departamento de Producción Vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia

Septiembre 2010



## Agradecimientos

---

Finalmente, me encuentro delante de la pantalla del ordenador con el documento de texto en blanco preparado para expresar mi gratitud a las personas que me han ayudado durante esta etapa, profesional y por supuesto también personal, de mi vida. Y digo finalmente, porque escribir este apartado significa estar ya en la recta final de este proyecto, satisfecha de estar a punto de completar el trabajo y expectante de cómo empezará y se desarrollará mi nueva etapa profesional.

En primer lugar, quisiera dar las gracias a los directores de la Tesis: Dr. Zhu Defeng y Dr. José M<sup>a</sup> Osca. A Zhu, por haberme enseñado la importancia de la rigurosidad y disciplina en el trabajo de la investigación. Trabajar bajo su tutela durante este tiempo no sólo me ha permitido aprender sobre la ciencia del arroz si no que ha sido una experiencia vital muy interesante y gratificante. A José M<sup>a</sup>, por sus rápidas respuestas y sus orientaciones en los momentos clave de la Tesis.

Para continuar, deseo mostrar mi gratitud a mis compañeros “del arroz” de la Estación Experimental del Ebro en Amposta: M<sup>a</sup> del Mar, Eva, Núria y José Luis. Compartir trabajo y experiencias con ellos ha sido muy estimulante, reconfortante e incluso, en muchísimas ocasiones, divertido. He aprendido mucho, con y gracias a ellos. También deseo expresar mi agradecimiento al director del centro, Tomàs Fosch, por su involucración en el desarrollo de mi trabajo. Por supuesto, no debo ni quiero olvidarme de los estudiantes de prácticas: Marc, Jaume y Heribert. Los tres han colaborado y muy

pacientemente se han implicado en el proyecto, realizando todas las tareas que se les encomendaba, algunas de ellas muy laboriosas y tediosas.

Para el final me dejo a mi gran sustento personal incondicional: mi familia y mi marido. Muchas gracias a mis padres, Llorenç y Manolita, y a mis hermanos, Llorenç y Carmina, por ser mi más sólido y efectivo apoyo y por su tiempo dedicado a escuchar mis inquietudes, satisfacciones, miedos y alegrías durante estos cuatro años. Sobre todo, y de forma muy especial, quiero dar las gracias a mi marido, Ramon, por su ayuda para llevar a cabo el que ha sido durante cuatro años nuestro proyecto. Sin su paciencia, comprensión, cariño y sacrificio, hubiese sido mucho más difícil completar este trabajo.

## Resumen

---

### Caracterización y optimización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro

El ahijado del arroz es una fase clave para el rendimiento del cultivo, pues a través de ella se determinará la densidad de panículas, uno de los componentes del rendimiento con más influencia sobre la productividad. Sin embargo, se conocen pocos estudios sobre la caracterización de esta fase en cultivo del arroz en siembra directa y en condiciones ambientales correspondientes al clima mediterráneo, como es el caso del Delta del Ebro.

A partir del cuarto estadio foliar, empieza el ahijado del arroz mediante el desarrollo y crecimiento de los tallos, hasta alcanzar la fase de máximo ahijado, que es el momento en el que se consigue la densidad máxima de tallos en planta y en superficie. Desde este momento, tienen lugar procesos de senescencia de tallos hasta que finalmente queda definido el número final de tallos productivos y consecuentemente, los que desarrollarán panícula. El balance final se evalúa a través de la eficiencia del ahijado, que es la relación entre el número máximo de tallos desarrollados y el número final de panículas. La competencia intraespecífica por los recursos como la luz, agua y nutrientes así como el estado de la planta determinan la mortalidad de los tallos. De forma general, los tallos tardíos son los que menores tasas de supervivencia presentan, por haber dispuesto de menos tiempo para su desarrollo y, en consecuencia, por ser competitivamente inferiores respecto los más precoces. Esta competencia intraespecífica establecida en el cultivo podría limitar el potencial productivo del arroz.

Teniendo en cuenta este comportamiento general, se estableció como objetivo general de la presente Tesis la limitación del desarrollo del ahijamiento tardío y el estímulo del prematuro, a través de prácticas agronómicas, para así poder mejorar la productividad del cultivo del arroz. El estudio se fundamentó en dos líneas de investigación a partir de las cuales se definieron los diferentes experimentos. La primera de ellas consistió en la caracterización del ahijado en siembra directa y en condiciones de clima mediterráneo, así como en el estudio de su comportamiento en diferentes prácticas de cultivo: fertilización nitrogenada, densidad de planta y manejo de agua. También se consideró la influencia del genotipo en el ahijamiento. Para ello, se llevaron a cabo dos experimentos desde 2007 hasta 2009. En el primero de ellos, se estudiaron los factores dosis de siembra y variedad; en el segundo, los factores manejo de agua, fertilización nitrogenada y dosis de siembra. En la segunda línea de investigación se pretendía la introducción de una técnica de cultivo que permitiera intervenir en el proceso para conseguir mejorar la eficiencia del ahijamiento y del rendimiento del cultivo. Se desarrolló un único experimento de dos años de duración (2008-2009) en el que se compararon, bajo dos dosis de siembra, diferentes técnicas de manejo de agua que permitieran la interrupción del ahijamiento.

En cuanto a la dosis de siembra, se consideró un rango de dosis entre los 60 y 320 Kg. semilla x ha<sup>-1</sup>. El ahijado otorga tal plasticidad al cultivo que permite una gran estabilidad en la densidad de panículas en amplios rangos de dosis de siembra y con pocas diferencias en el rendimiento. A partir de dosis de siembra de 80 Kg. Semilla x ha<sup>-1</sup> o 100 plantas x m<sup>-2</sup> no hay respuesta en el rendimiento y no se encontró una densidad de planta óptima.

El riego intermitente superficial así como una aportación precoz del abonado nitrogenado de cobertera en el ahijado estimulan el ahijado precoz contribuyendo a un mayor desarrollo vegetativo de la planta. Este estímulo se puede traducir en una mayor producción de tallos y en el subsiguiente aumento del potencial productivo del cultivo gracias a la relación positiva entre la densidad máxima de tallos y de panículas. Sin embargo, esta mejora no siempre tiene lugar debido a las relaciones compensatorias establecidas en el cultivo a partir de la fase de máximo ahijado. Entre los diferentes efectos compensatorios, el más relevante es la mortalidad de los tallos. La mayor densidad de tallos conseguida mediante el estímulo del ahijado provoca una mayor senescencia de éstos a causa del mayor grado de competencia intraespecífica establecida, siendo el resultado final una leve o nula superioridad en la densidad de panículas.

El control del ahijado consiste en su interrupción en el momento a partir del cual se estima que tendrá lugar el ahijado improductivo. La técnica para conseguir el cese del ahijamiento consiste en un aumento de la profundidad de la lámina de agua. Cuando se interrumpe el ahijamiento, se reduce el número máximo de tallos por lo que el grado de competencia por los recursos entre los tallos se reduce y disminuye, consecuentemente, la mortalidad de los tallos. Esta reducción permite superar la densidad final de panículas de las parcelas en las que no se interviene en el ahijamiento, aun partiendo de una densidad de tallos inferior. Finalmente, el mayor número de panículas por unidad de superficie repercute de forma directa en el rendimiento del cultivo.

## Caracterització i optimització de l'afillolat de l'arròs en el Delta de l'Ebre

L'afillolat de l'arròs és una fase clau per al rendiment del cultiu atès que a través d'aquesta es determina la densitat de panícules, un dels components del rendiment que exerceix més influència sobre la producció. Malgrat això, es coneixen pocs estudis sobre la caracterització d'aquesta fase del cultiu de l'arròs en sembra directa i en condicions ambientals pròpies de clima mediterrani com és el cas del Delta de l'Ebre.

A partir del quart estadi foliar, comença l'afillolat de l'arròs mitjançant el desenvolupament i creixement dels fillols, fins assolir la fase de màxim afillolat, moment en el que s'arriba a la densitat màxima de fillols en planta i superfície. Des d'aquest moment, tenen lloc processos de senescència de fillols fins que finalment es defineix el número final de fillols productius o, el que és el mateix, es defineix la densitat de panícules. El balanç final s'avalua a través de l'eficiència de l'afillolat, que és la relació entre la densitat màxima de fillols i la de panícules. La competència intraespecífica pels recursos com la llum, aigua i nutrients així com l'estat de la planta determinen la mortalitat dels fillols. De manera general, els fillols tardans són els que menors taxes de supervivència presenten, per haver disposat de menys temps per al seu desenvolupament. Aquest fet els fa competitivament inferiors respecte els primerencs. Aquesta competència intraespecífica establerta en el cultiu podria limitar el potencial productiu de l'arròs.

Tenint en compte aquest comportament general, es va establir com objectiu general de la present Tesi la limitació del desenvolupament de l'afillolat tardà i

l'estímul del primerenc mitjançant pràctiques agronòmiques per aconseguir millorar la productivitat del cultiu de l'arròs. L'estudi es va fonamentar en dues línies de recerca a partir de les quals es van definir els diferents experiments. La primera línia va consistir en la caracterització de l'afillolat en sembra directa en una àrea de clima mediterrani i sota diferents pràctiques de cultiu: fertilització nitrogenada, dosi de sembra i maneig d'aigua. També es va considerar la influència del genotip en l'afillolat. La segona línia pretenia la introducció d'una tècnica de cultiu que permetés intervenir en el procés per aconseguir millorar l'eficiència de l'afillolat i del rendiment del cultiu. Per l'avaluació de la influència de diferents factors agronòmics en l'afillolat, es van dur a terme dos experiments des de 2007 fins 2009. En el primer d'ells, es van estudiar els factors dosi de sembra i varietat; en el segon, els factors fertilització nitrogenada, maneig d'aigua i dosi de sembra. El segon eix de la recerca es va basar en un únic experiment de dos anys de duració (2008-2009) en el que es van comparar, a dues dosis de sembra, diferents tècniques del maneig d'aigua que permetessin la interrupció de l'afillolat.

En quant a la dosi de sembra, es va considerar un rang comprès entre els 60 i 320 kg de llavor x ha<sup>-1</sup>. L'afillolat aporta al cultiu la plasticitat necessària per permetre una gran estabilitat en la densitat de panícules en amplis rangs de dosis de sembra i amb poques diferències en el rendiment. A partir de dosis de sembra de 80 kg de llavor x ha<sup>-1</sup> o de 100 plantes x m<sup>-2</sup>, no hi ha resposta en el rendiment i no es va trobar una densitat de planta òptima.

El reg intermitent superficial així com una aportació primerenca de l'adobat nitrogenat a l'afillolat estimulen l'emergència dels fillols precoços, contribuint a un major desenvolupament vegetatiu de la planta. Aquest estímul es pot traduir

en una major producció de fillols i en un consegüent augment del potencial productiu del cultiu a través de la relació positiva entre la densitat màxima de fillols i la de panícules. Tot i això, aquesta millora no sempre es produïa donades les relacions compensatòries establertes en el cultiu a partir de la fase de màxim afillolat. Entre els diferents efectes compensatoris el més important és la mortalitat de fillols. La major densitat de fillols aconseguida mitjançant l'estímul de l'afillolat provoca una major senescència d'aquests a causa d'un grau de competència intraespecífica més intens, donant com a resultat només una lleugera o nul·la superioritat en la densitat de panícules.

El control de l'afillolat consisteix en la seva interrupció en el moment a partir del qual s'estima que tindrà lloc l'afillolat improductiu. La tècnica per aconseguir el cessament de l'afillolat consisteix en un augment de la profunditat de la làmina d'aigua. Quan s'interromp l'afillolat, es redueix el número màxim de fillols, reduint d'aquesta manera el grau de competència pels recursos entre els fillols i, consegüentment, disminueix també la mortalitat. Aquesta reducció permet superar la densitat final de panícules de les parcel·les on no s'ha intervingut l'afillolat, tot i havent partit d'una densitat de fillols inferior. Finalment, el major número de panícules per unitat de superfície repercuteix de forma directa en el rendiment del cultiu.

## **Characterization and optimization of tillering in direct seeded rice in Ebro Delta Area**

Tillering in rice crop plays an important role in yield because of its strong influence on panicle density, which is an important yield component. However, little studies on tillering characterization in direct seeded rice in a Mediterranean environment, such as Ebro Delta area, are known.

Tillering in rice plants starts at the fourth leaf stage and the growing and development of tillers continues until reaching the maximum tiller number stage. From that moment on, some tillers start dying. At the end of tiller senescence, the final productive tiller number or, what is the same, the panicle density, is set. The global balance between tiller production and tiller senescence is evaluated through the tillering efficiency, which is the ratio of maximum tiller number and panicle density. Tiller mortality is regulated by intraspecific competence established among tillers for sources such as light, water and nutrients. In general, late emerging tillers show lower survival rates because of disposing of less time. Such competition could result in a reduction in potential yield in rice crop.

The objectives of this Thesis were set according to the general performance of rice tillering process and consist of promoting early tillering and reducing the later one by agronomical practices so as to improve rice yield. The study was structured in two lines of research through which different experiments were designed. The first line consists of the characterization of tillering in direct seeded rice and in a Mediterranean environment under different cultural practices: nitrogen fertilization, sowing dose and water management. Influence

of genotype is also considered. For that purpose, two experiments were carried out from 2007 to 2009. In the first one, sowing dose and two varieties were studied; in the second experiment, water management, nitrogen fertilization and sowing dose were considered. The aim of the second line of research was the control of tillering process by water management is pretended in order to improve tillering efficiency and rice yield. In this occasion, an experiment was set from 2008 to 2009 were different water managements for tillering control were compared.

In reference to the influence of sowing dose on tillering, a wide range of sowing doses (from 60 to 320 Kg. seeds x ha<sup>-1</sup>) were studied. Rice is a crop with a high tillering ability that confers the crop the property of plasticity. Such plasticity results in a high stability in panicle density and yield. From 80 Kg of seed x ha<sup>-1</sup> or 100 plants x m<sup>-2</sup> no response in yield is observed. No optimal panicle density is found.

Shallow and intermittent water management and early nitrogen fertilization at tillering stages promote early tillering contributing to a better vegetative growth. That could cause a higher tiller production and the subsequent increase in rice yield potential because of the positive relationship between maximum tiller number and panicle density. However, that result not always takes place because of the compensatory effects established from the maximum tiller stage. Tiller senescence, which is one of these compensatory effects, is given by competitive relationships among tillers. Finally, no increase in panicle number and, subsequently neither in yield are found.

Tiller control consists in the cessation of tiller emergence at the beginning of unproductive tillering. Cessation of tiller emergence occurs by increasing water layer in rice fields and, as a consequence, maximum tiller number decreases due to the reduction of competition among tillers. Consequently, tiller mortality decreases leading to a higher panicle density when it is compared with plots with no tillering control. Then, rice yield increases because of the higher panicle density.



# ÍNDICE

---

1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 EL DELTA DEL EBRO: CONDICIONES AMBIENTALES Y EL SISTEMA PRODUCTIVO DEL CULTIVO DEL ARROZ.....	19
1.1.1 Condiciones ambientales.....	19
Situación y superficie .....	19
Características climatológicas .....	19
Topografía e hidrología.....	20
1.1.2 El cultivo de arroz en el Delta del Ebro .....	20
1.2 ESTUDIO DEL AHIJADO DEL ARROZ EN EL DELTA DEL EBRO .....	30
1.2.1 Antecedentes y justificación .....	30
1.2.2 Objetivos .....	40
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	45
2.1 EXPERIMENTOS.....	46
Experimento 1: Dosis de siembra y variedades.....	46
Experimento 2: Manejo de agua-Fertilización nitrogenada-Dosis de siembra .....	47
Experimento 3: Control del ahijamiento mediante el manejo del agua.....	48
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	50
Experimento 1: Dosis de siembra y variedades.....	50
Experimento 2: Manejo de agua-Fertilización nitrogenada-Dosis de siembra .....	51
Experimento 3: Control del ahijamiento mediante el manejo del agua.....	51
2.3 UNIDADES EXPERIMENTALES.....	52
2.3.1 Subparcelas.....	52

Datos climáticos .....	55
2.3.2. Marco de monitorización de las plantas .....	56
2.3.3 Microparcelas de dinámica poblacional.....	59
2.4 ANÁLISIS DE DATOS .....	61
2.5 PRÁCTICAS DE CULTIVO.....	63
2.5.1 Laboreo, siembra y prácticas culturales .....	63
2.5.2 Manejo de agua.....	64
2.5.3 Abonado .....	65
2.5.4 Control de malezas, plagas y enfermedades.....	65
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	69
3.1 DATOS CLIMÁTICOS .....	69
3.1.1 Datos climáticos ambientales.....	69
3.1.2 Temperatura en el agua y suelo del cultivo.....	77
3.2 MONITORIZACIÓN DEL AHIJAMIENTO DEL ARROZ.....	82
3.2.1 Desarrollo foliar .....	82
3.2.1.1 Número final de hojas en el tallo principal.....	83
3.2.1.2 Dinámica y tasa del desarrollo foliar. Modelización.....	84
3.2.1.3 Factores que afectan al desarrollo foliar .....	88
3.2.2 Arquitectura de la planta de arroz .....	100
3.2.2.1 Sistema de ramificación de las plantas de arroz .....	100
3.2.2.2 Diferenciación y crecimiento de las yemas axilares .....	105
3.2.2.3 Estructura jerárquica de las plantas de arroz.....	108
3.2.3 Dinámica del ahijamiento en planta .....	129
3.2.3.1 Estadios del ahijado del arroz.....	132
3.2.3.2 Eficiencia del ahijamiento.....	139
3.2.3.3 Factores que inciden en la dinámica del ahijamiento.....	141

3.2.4 Sincronismo entre las dinámica del ahijado y el desarrollo foliar en el tallo principal .....	157
3.2.5 Productividad de los tallos .....	161
3.2.5.1 Tasa de supervivencia o productividad de las panículas .....	162
3.2.5.2 Rendimiento y sus componentes en planta y en las panículas según su posición .....	167
3.2.5.3 Contribución al rendimiento en planta de las panículas según el orden .....	173
3.2.5.4 Factores que afectan al rendimiento de la planta y la productividad de los tallos .....	181
3.3 DINÁMICA POBLACIONAL DEL AHIJADO Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO .....	207
3.3.1 Caracterización de la dinámica poblacional y su relación con el rendimiento y los componentes del rendimiento .....	207
3.3.2 Rendimiento y componentes del rendimiento .....	211
3.3.3 Relación entre la dinámica poblacional del ahijado y el rendimiento .....	217
3.3.4 Factores que afectan la dinámica poblacional del ahijado y su influencia sobre el rendimiento y los componentes del rendimiento .....	223
3.3.4.1 Variedades .....	223
3.3.4.2 Densidad de planta .....	224
3.3.4.3 Manejo de agua y fertilización nitrogenada .....	236
3.4 CONTROL DEL AHIJAMIENTO A TRAVÉS DEL MANEJO DE AGUA .....	252
3.4.1 Efectos del control del ahijamiento sobre la dinámica poblacional y su relación con el rendimiento .....	255
3.4.1.1 Evaluación del método para el control ahijamiento y su influencia sobre la dinámica poblacional .....	255
3.4.1.2 Influencia del control del ahijamiento sobre el rendimiento y los componentes del rendimiento .....	261

3.4.2 Efectos del control del ahijamiento sobre la dinámica en planta y su relación con el rendimiento .....	267
Evaluación del método para el control ahijamiento y su influencia sobre la dinámica a nivel de planta.....	267
3.4.2.2 Influencia del control del ahijamiento sobre el rendimiento en planta y los componentes del rendimiento.....	270
4. CONCLUSIONES.....	275
4.1 Desarrollo foliar en el cultivo del arroz en el Delta del Ebro .....	275
4.2 Caracterización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro .....	276
4.3 El ahijamiento precoz y su influencia en el rendimiento.....	278
4.4 Influencia de la densidad de planta en el ahijado y su repercusión en el rendimiento .....	279
4.5 Control del ahijamiento a través del manejo de agua .....	281
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	285





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 EL DELTA DEL EBRO: CONDICIONES AMBIENTALES Y EL SISTEMA PRODUCTIVO DEL CULTIVO DEL ARROZ

### 1.1.1 Condiciones ambientales

#### Situación y superficie

El Delta del Ebro está situado en la costa norte oriental de España, en el mar Mediterráneo, en la comunidad autónoma de Catalunya. Pertenece a los términos municipales de l’Ampolla, Camarles, Deltebre, Amposta, L’Aldea, Sant Jaume d’Enveja y Sant Carles de la Ràpita, abarcando las comarcas catalanas del Baix Ebre y Montsià, y todos ellos en la provincia de Tarragona.

El río Ebro cruza el delta de Oeste a Este, dividiéndolo en dos grandes zonas o hemideltas: el izquierdo (Norte) y el derecho (Sur). Su superficie total es de 32.059 ha, de las cuales 11.922 ha corresponden al hemidelta izquierdo y 18.649 ha al derecho.

#### Características climatológicas

El clima en el Delta del Ebro es el Mediterráneo, con inviernos suaves y veranos cálidos.

La media pluviométrica se sitúa alrededor de los 530 mm anuales, concentrándose en las estaciones de primavera (marzo-mayo) y otoño (septiembre-octubre). La humedad relativa se mantiene estable durante todo el año.

La media de temperaturas varía de los 25º C en julio y agosto hasta los 9º C en enero y febrero, época en la que se pueden producir heladas nocturnas.

## Topografía e hidrología

El Delta del Ebro es una superficie llana con una altura máxima de 4.5 m localizada en la ciudad de Amposta. Los márgenes del río están a unos 3 m por sobre el nivel del mar. Desde estos márgenes, la pendiente avanza en dirección noreste en el margen izquierdo y sureste en el derecho hasta alcanzar el nivel del mar. Es una pendiente del orden de 0.01% hasta 0.02%.

En cuanto a los recursos hidráulicos, el caudal medio es de 300 m<sup>3</sup>/s (*Consorti d'aigües de Tarragona, 1991*). El agua es considerada de buena calidad para la irrigación, con una media de salinidad por debajo del 1.5 dS x m<sup>-1</sup> durante el año.

### 1.1.2 El cultivo de arroz en el Delta del Ebro

El desarrollo del cultivo del arroz en el Delta del Ebro está relacionado con las características especiales de la zona, tanto climáticas como edafológicas, que permiten su aprovechamiento a suelos que, por su salinidad y altura de la capa freática, no permiten ningún otro tipo de explotación.

Los campos de arroz están delimitados por zona del Parque Natural del Delta del Ebro, cuya extensión se localiza en los márgenes litorales del delta. Actualmente está plenamente reconocida la ayuda del ambiente del arrozal a la biodiversidad del Parque Natural por ser zonas de albergue y alimentación de numerosas aves acuáticas. En el marco de la Política Agraria Común y sus políticas de acompañamiento sobre métodos de producción agraria, a través del Reglamento (CE) núm. 2078/92 se introdujo en la Unión Europea el compromiso de introducir unas prácticas agroambientales que compatibilizaran la producción agraria con la protección ambiental. El Reglamento prevé el establecimiento de contratos entre los titulares de las

explotaciones y la administración, de una duración mínima de cinco años, mediante los cuales los primeros se comprometen a introducir unas prácticas agroambientales en su explotación a cambio de recibir de la administración una prima que compensará la disminución de la renta derivada de las correspondientes actuaciones. En 1998, se introdujo un programa que consistía en el régimen de ayudas para el fomento de los métodos de producción agraria compatibles con la protección medioambiental en los humedales incluidos en el listado de la Convención Ramsar (Bartual-Figueras, 2005). Este programa implicaba al cultivo del arroz en Cataluña ya que tanto el Delta del Ebro como los humedales del Empordà, están incluidos en dicho listado. El último programa abarca el periodo 2007-2012 y algunas de las medidas y compromisos que incluye son: mantenimiento de la inundación de los campos durante el periodo otoño-invierno, racionalización de los tratamientos contra el barrenador del arroz (*Chilo suppressalis*) mediante lucha biológica o feromonas, el mantenimiento y conservación de elementos de retención del agua y el control de las malas hierbas, desde octubre hasta marzo, debe ser mecánico.

El cultivo del arroz en el Delta del Ebro se localiza en el tiempo desde finales de abril hasta finales de septiembre, momento de la cosecha.

### **1.1.2.1 Preparación del suelo**

Los campos de arroz están divididos en parcelas más o menos rectangulares delimitadas por márgenes o de unos 30 cm de alto. Las parcelas no suelen superar las 3 ha de extensión para evitar los daños en plántulas causadas por las olas producidas por el viento y que aumentan su altura a medida que se incrementa su superficie de expansión. Además, una superficie no excesiva permite el mejor control del agua dentro de la parcela.

Durante el invierno, concretamente desde mediados de octubre hasta enero, los campos de arroz, sin cultivo, permanecen inundados. Esta práctica cultural responde a uno de los compromisos adquiridos por el agricultor para el cobro de las ayudas agroambientales. Una vez pasada la inundación invernal exigida, se drenan los campos y se dejan secar para, posteriormente empezar con las labores del terreno pertinentes.

El laboreo empieza a finales de febrero, según las condiciones meteorológicas y consiste en diferentes fases: laboreo profundo, superficial y nivelado. La profundidad de trabajo durante el primer laboreo oscila entre los 15 y 20 cm. Con el laboreo superficial se consigue suavizar la estructura del suelo, dejándolo apto para la siembra por tener las condiciones óptimas para el anclaje de las raíces de la plántula. El nivelado se realiza con láser y permite un fácil manejo del agua, manteniendo la profundidad constante a lo largo de la parcela y favoreciendo el sistema de drenaje y llenado del campo en los momentos en que estas prácticas deben llevarse a cabo. Dado el alto coste de esta labor, algunos agricultores optan por nivelar sus parcelas cada 2 ó 3 años.

Aquellas parcelas en las que se realice el control mecánico del arroz salvaje, estas labores se ampliarán. En este caso, después del nivelado, los campos permanecen inundados durante aproximadamente 10 días, momento en que se realizará el fangueado con “ruedas de agua” para combatir la población de arroz salvaje. Éste es el método denominado como falsa siembra y, según el grado de infestación, esta operación se realiza dos veces antes de la siembra.

Después del nivelado, el siguiente paso es la inundación.

### *1.1.2.2 Ciclo del arroz*

A continuación se describen los diferentes estadios del arroz localizándolos en el tiempo:

#### *1.1.2.2.a Siembra*

Tiene lugar del 15 de abril al 15 de mayo aproximadamente. El método utilizado en toda la superficie arroceras es la siembra directa y en terreno inundado. La semilla ha estado en previamente a remojo de 12 a 36 horas más 24 horas posteriores de secado. Se distribuye en tractor, a través de una tolva dispersora con hélices, o bien con aeronave en las fincas grandes. La dosis de siembra puede oscilar de los 160 a 200 kg semilla por hectárea.

#### *1.1.2.2.b Fase vegetativa*

La germinación y el establecimiento de plántula presentan una duración aproximada de unos 20-30 días. La fase del establecimiento de plántula es crítica para el buen desarrollo del cultivo. Actualmente se estima un porcentaje de éxito en el Delta del Ebro de un 30% aunque este valor se comporta de forma irregular en los años. El manejo del agua, las condiciones del suelo y la presencia de la plaga de quironómidos son factores influyentes en el desarrollo de esta etapa.

Cuando la planta ya ha enraizado y ha desarrollado cuatro hojas empieza a producir tallos, dando lugar a la fase del ahijado del arroz, que se alarga lugar finales de junio o principio de julio. Este estadio es el objeto de estudio de la presente Tesis Doctoral por lo que se profundiza sobre sus características a lo largo de este trabajo.

#### *1.1.2.2.c Fase reproductiva*

Esta fase se consta de tres estadios distintos: iniciación de panícula, encañado o alargamiento del tallo y el espigado. El inicio o diferenciación de panícula se sitúa al principio o mitad de julio, sobre unos 60 días después de la siembra y es seguido del encañado. Unos 10 ó 15 días (finales de julio o principios de agosto), después del estado de diferenciación de la panícula tiene lugar la floración y espigado, que tienen lugar de forma prácticamente simultánea.

#### *1.1.2.2.d Fase maduración*

Se considera que se ha logrado esta fase cuando el peso máximo de grano ya se ha alcanzado. La cosecha suele realizarse varios días después de haber alcanzado la maduración. Los criterios para decidir el momento de la cosecha se basan en la coloración del grano, la senescencia de las hojas y la estimación de la humedad del grano, que debe oscilar entorno el 20%. El período de cosecha tiene lugar desde finales de agosto hasta finales de septiembre. El principal problema de este estadio es de origen meteorológico pues las fuertes tormentas suelen tener lugar en estas fechas, provocando el encamado y la consecuente pérdida de cosecha y de calidad del grano.

#### *1.1.2.3 Sistema de irrigación*

El Delta del Ebro está cubierto por una extensa red de canales y desagües que permite la distribución del agua por toda la superficie arrocerá. El agua proveniente del río Ebro llega a las parcelas a través de canales primarios, secundarios y hasta terciarios. Cada parcela dispone de su boca de riego que permite el control del agua por parcela. La evacuación se realiza a través de los desagües secundarios que convergen en los primarios que desembocan o bien en las lagunas naturales del Delta o bien directamente a las bahías.

La gestión del agua está desempeñada por dos comunidades de regantes, cada una situada en un margen del Delta. Sus funciones básicas son el mantenimiento de la infraestructura hidráulica así como la gestión del caudal de agua circulante por la red de canales.

El sistema de irrigación en el cultivo de arroz en el Delta del Ebro consiste en la inundación. Este sistema permite el control de la salinidad de los campos de arroz por impedir la subida de las sales por capilaridad. La inundación es casi permanente durante todo el ciclo del arroz, exceptuando los momentos en que algunas prácticas agrícolas requieren un drenaje, y consiste en la entrada y salida constante de agua en el campo, manteniendo así la profundidad de agua deseada. Este tema está ampliamente abordado en esta Tesis Doctoral pues se propone un sistema alternativo consistente en el riego superficial intermitente durante el ahijado para favorecer el desarrollo vegetativo.

#### ***1.1.2.4 Fertilización***

La principal aportación de fertilizantes tiene lugar con las labores preparatorias del terreno, incorporándose con ellas el abonado de fondo. Esta fertilización en fondo puede ser complementada por una o dos aplicaciones más en cobertera durante el ahijado y el inicio de panícula, aunque muchos agricultores evitan las coberteras por el impacto sobre la estructura del suelo que representa la entrada de maquinaria pesada en los campos.

La aportación de nitrógeno está, por lo general, alrededor de los de 150 UF N x ha<sup>-1</sup>, aplicados en forma de urea o sulfato amónico.

Las dosis medias de fósforo y potasio se sitúan en 50 y 100 kg x ha<sup>-1</sup> respectivamente, aplicados en fondo.

### 1.1.2.5 Enfermedades, plagas y malas hierbas

La *pyriculariosis* y *helminthosporiosis* son las principales enfermedades del arroz en el Delta del Ebro. Cabe destacar que el Servicio de Sanidad Vegetal del Departament d'Agricultura, Alimentación y Acción Rural de la Generalitat de Catalunya realiza un seguimiento de las enfermedades con el objetivo de informar a los agricultores del momento adecuado para realizar los tratamientos químicos a través de una red de avisos. Las condiciones meteorológicas tienen una gran influencia sobre el grado de infestación de la enfermedad, de forma que el número de tratamientos requeridos puede variar según el año, pero suelen ser unas 2 aplicaciones.

Las plagas más importantes son los quironómidos y *Chilo suppressalis*. El barrenador del arroz o *Chilo suppressalis* es un barrenador perteneciente al orden de los lepidópteros cuya larva ataca las cañas del arroz, comiéndosela por dentro produciendo el secamiento del tallo y, según el momento del ataque, la pérdida total de producción en este tallo. Su control es realizado por la Agrupación de Defensa Vegetal del Arroz en el Delta del Ebro, quien utiliza el trampeo masivo con el uso de feromonas para su control a través del trampeo masivo con feromonas complementada por la lucha química en aquellas zonas en las que sea estrictamente necesario. Los quironómidos son larvas de dípteros y su potencial dañino tiene especial relevancia durante el estadio de germinación y establecimiento de plántula, momento en que atacan al embrión y a las raíces de las plántulas. Su potencial dañino es elevado de forma que en varias ocasiones han ocasionado una pérdida casi total de la semilla sembrada y obligando a realizar una segunda siembra al agricultor. En condiciones de largos períodos de inundación antes de la siembra se favorece el establecimiento y crecimiento de esta población. Su control se realiza a través de la aplicación

de insecticidas aunque actualmente sólo hay una materia activa autorizada, Etofenprox. Esta situación conduce al estudio de nuevos sistemas de control basados o bien en la lucha biológica o bien en métodos agronómicos.

Las principales malas hierbas que invaden el cultivo de arroz son especies pertenecientes al género *Echinochloa* (*E. crus-galli*, *E. hispidula*, *E. oryzoides*), al género *Scirpus* (*S. maritimus*, *S. mucronatus*) y el arroz salvaje (*Oryza sativa*). Las principales materias activas permitidas para la lucha contra *Echinochloa spp.* son: Propanil, Azimsulfuron, Cyhalofop-butil. En el caso de *Scirpus spp.* las materias activas autorizadas son: Bensulfuron o Bentazona. En cuanto al arroz salvaje, la problemática es especial por pertenecer al mismo género que el arroz cultivado, dificultando su control por no haber herbicidas específicos que no causen daños al cultivo. Esta situación conduce a la práctica de la técnica de la falsa nacencia o falsa siembra para su control. A partir de este momento, existen dos posibilidades de control. La primera consiste en un control mecánico con el fangueado. Este método tiene una eficacia estimada de una 85% o a veces incluso superior. En caso de casos muy infestado, pueden ser necesarios dos fangueados. El segundo tipo de control consiste en la aplicación de herbicidas, Cicloxidim o Cletodim. Este método requiere un manejo de agua consistente en la alternancia de inundación y drenaje de los campos para evitar problemas de fototoxicidad provocados por residuos del herbicida.

Hay que destacar la reciente presencia de *Heterantera spp.* y *Leptochloa sp.* en los campos del Delta del Ebro. El herbicida utilizado suele ser Oxidiazón y se aplica en preemergencia y antes de la siembra y, además, también presenta eficacia contra *Echinochloa spp.* i arroz salvaje.

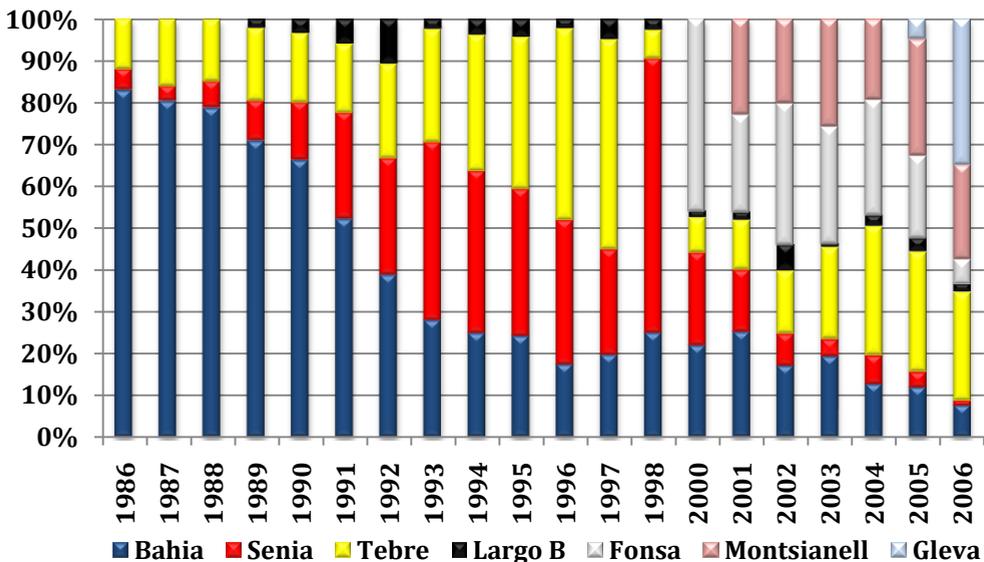
#### **1.1.2.6 El perfil varietal en el Delta del Ebro**

La información aportada en el presente apartado corresponde a un resumen del artículo *“Evolución de las variedades de arroz cultivadas en el Delta del Ebro en los últimos 20 años”* (Català, et al., 2007).

Las variedades de arroz cultivadas han ido variando en los últimos años, mediante una gradual renovación de las más antiguas, en función de las mejores características que iban presentando. De forma mayoritaria, las variedades utilizadas son de grano medio perlado. Las nuevas variedades ofrecen mejores rendimientos, una mayor resistencia a plagas y enfermedades, altura más baja para mejorar la resistencia al encamado, mejor calidad de grano o bien una mayor producción (Franquet y Borràs, 2004).

A finales de los años 80 se cultivaba mayoritariamente la variedad Bahía, representando casi el 90 % de la superficie arrocera, pero con el tiempo otras variedades han ido ganando importancia hasta llegar al escenario actual en el que hasta 5 variedades distintas conviven en los campos de arroz del Delta del Ebro, con porcentajes de cultivo similares.

Efectivamente, a partir del año 2000 y mediante programas de mejora, aparecieron nuevas variedades con características que se adaptaban mejor a las condiciones del Delta del Ebro. Algunas de estas nuevas variedades son Fonsa, Montsianell y Gleva.



**Fig. 1 Evolución varietal del cultivo de arroz en el Delta del Ebro (1986-2006)**

Por lo que respecta a las variedades de grano largo, se empezaron a cultivar a partir del 1989, pero nunca han sido variedades representativas de la zona. Cabe remarcar que en los noventa, gracias a las ayudas que recibían los agricultores por cultivar arroz de grano largo el porcentaje de este tipo de arroz se incrementó sensiblemente.

La variedad Bomba, muy conocida por los consumidores por sus peculiaridades organolépticas y su comportamiento en la cocción, se viene cultivando desde casi la introducción del cultivo del arroz en el delta del Ebro. Actualmente ocupa una superficie media del 5 %.

## 1.2 ESTUDIO DEL AHIJADO DEL ARROZ EN EL DELTA DEL EBRO

### 1.2.1 Antecedentes y justificación

El ahijado del arroz es el estadio fisiológico, dentro de la fase vegetativa, que va desde la aparición del primer tallo a partir de una yema en uno de los nudos más inferiores del tallo principal hasta el inicio de la fase de inicio de panícula, dando también fin a la fase vegetativa. El ahijado es el principal factor determinante de la producción de panículas y, en consecuencia, afecta el rendimiento.

Existen diversos estudios sobre la caracterización del ahijado del arroz y su repercusión en el rendimiento pero muchos de ellos hacen referencia a arroz trasplantando, a variedades tipo índica y cultivos en condiciones climáticas muy diferentes a las mediterráneas. Todos estos parámetros inciden en el comportamiento del ahijado, sin embargo apenas existen estudios en condiciones de siembra directa, con variedades japónica y en condiciones ambientales típicas de un clima mediterráneo, por lo que resulta de interés contrastar la evolución del ahijado en estas condiciones. Además, el factor varietal tiene una gran importancia en esta fase puesto que la producción de tallos en el cultivo del arroz responde en gran medida a factores genotípicos.

El sistema de cultivo, esto es siembra directa o trasplante, influye sobre el comportamiento del ahijado, por lo que el intercambio de resultados entre ambos sistemas debe ser previamente analizado. En general, el ahijado del arroz en siembra directa es más rápido que en trasplante (San-oh, 2003), lo que promueve la formación de una mayor área foliar y consecuentemente, mejora la interceptación solar. Sin embargo, es más fácil que en estas condiciones se cree una situación de crecimiento vegetativo excesivo que podría repercutir

negativamente en la productividad del cultivo. Sobre la conveniencia del estímulo de crecimiento vegetativo en los primeros estadios, diversos autores apuntan en direcciones opuestas. Algunos autores (Schnier, *et al.*, 1990; Dingkuhn, *et al.*, 1992) consideran que el crecimiento vegetativo excesivo en los primeros estadios provoca una disminución de la captación de la radiación foliar por provocar un área foliar exagerada, aumenta la mortalidad de tallos, debilita el proceso de maduración e incrementa el riesgo de encamado, por lo que en general no supone ninguna ventaja al cultivo o incluso reduce su rendimiento. Otros, sin embargo, se muestran a favor del estímulo de vigor precoz porque aporta más materia seca en la cosecha que contribuye positivamente al rendimiento (San-oh, *et al.*, 2004) y compensa los efectos negativos en la eficiencia del ahijado (Pasuquin, *et al.*, 2008). En consecuencia, la siembra directa podría requerir de un sistema de control del ahijamiento, mediante técnicas agronómicas con tiempos o métodos diferentes a los propuestos en trasplante, que permitiría regular el crecimiento vegetativo traduciéndose en una mejora en el rendimiento en grano.

Otra diferencia entre los dos sistemas es la capacidad de convertir la materia seca en rendimiento en grano, siendo superior en el trasplante, de manera que la relación entre ahijado y rendimiento también será diferente. En densidades de planta medias, las plantas trasplantadas pueden producir entre 10-30 tallos mientras que las sembradas directamente en las parcelas desarrollan una media de 2 a 5 tallos (Yoshida, 1981) como consecuencia de la formación más rápida de la cubierta vegetal (Dingkuhn, 1990). Finalmente, hay que añadir que la eficiencia del ahijado es superior en arroz trasplantado en siembra directa (San-oh, *et al.*, 2004) o, lo que es lo mismo, los índices de mortalidad en trasplante son inferiores. La dinámica del ahijado también muestra diferencias

en cuanto a la localización de los tallos emergentes como consecuencia del mismo proceso de trasplante que provoca la rotura de las raíces y consecuentemente, se limita el desarrollo de los tallos de posiciones más bajas (Dingkuhn, *et al.*, 1991).

La capacidad de ahijamiento posee un fuerte componente genotípico, distinguiéndose variedades con baja y alta capacidad de ahijado. Su relación con el rendimiento es que en el primer caso, la menor capacidad de ahijado va asociada a panículas de mayor tamaño (*panicle-weight type*), de manera que el número de granos por panícula es el principal componente del rendimiento. En el segundo caso, en variedades con alta capacidad de ahijado, la producción responde al mayor número de panículas (*panicle-number type*) (Kim y Vergara, 1990). En diferentes programas de mejora se ha considerado este parámetro como elemento a considerar para el diseño de un tipo de planta muy productivo. Yoshida y Parao (1972) consideraban que las variedades con mayor capacidad de ahijado eran las más adecuadas por su vinculación con el número de panículas ya que consideraban que el tamaño de la panícula no dependía del tipo de tallo sino que únicamente de la densidad de panícula. Otros autores defienden variedades con poca capacidad de ahijado por su menor sensibilidad al encamado (Sheehy, *et al.*, 2001). Además, este tipo de variedades favorecerían la estabilidad en la producción por desarrollar tallos primarios de posiciones bajas con mayor probabilidad de ser productivos (Kim y Vergara, 1990). Sin embargo, Kim y Vergara, en su tipo de planta presentaban plantas con 6 panículas, lo que indica la importancia del entorno para este diseño puesto que en condiciones de siembra directa, en densidades de planta medias, las plantas no llegan a producir tantos tallos. Peng, *et al.* (2004) resumen la evolución de los programas de mejora para la creación de nuevas variedades

productivas que permitieran superar el techo en el rendimiento creado después del surgimiento de las variedades semienanas. En 1966, se liberó la variedad semienana IR8 que permitió un incremento del rendimiento en zonas arroceras tropicales de 6 a 10 t x ha<sup>-1</sup>. No obstante, no se pudo superar este incremento por su abundante producción de tallos improductivos que implicaba un crecimiento vegetativo excesivo con poca capacidad sumidero, especialmente en siembra directa. A partir de este momento, el IRRI (International Rice Research Institute) empezó un programa de mejora a partir de variedades tropicales japónica para la creación de nuevas líneas de una primera generación de un nuevo tipo de planta (NPT: *new plant type*). Las variedades de esta primera generación presentaban una baja capacidad ahijadora y panículas grandes y al mismo tiempo, baja producción de biomasa y poca capacidad de recuperación frente daños (causados, por ejemplo, por insectos) afectando negativamente su potencial productivo. En consecuencia, se emprendió una segunda generación de líneas. Esta nueva generación descendió de diversos cruces entre variedades japónica mejoradas, pertenecientes a la primera generación, con variedades “elite” tipo índica. La ascendencia japónica aportaría sus características productivas mientras que la índica mejoraría la capacidad ahijadora. Se liberaron, finalmente, variedades con mayor potencial productivo cuyas principales características, entre otras, eran la mayor producción de panículas por unidad de superficie (vía genes índica) y mejor porcentaje de llenado de granos (vía genes japónica). Por otro lado en China, el programa de mejora para la creación de las variedades híbridas muy productivas (*China's “super” rice breeding program*) incluye en su estrategia como características perseguidas la capacidad media de ahijado (270-300 panículas x m<sup>-2</sup>) y panículas pesadas a través del uso de genes tipo índica y japónica. En España, los programas de mejora varietal no incluyen la capacidad

del ahijado como carácter diana, si bien sus evaluaciones se centran únicamente en la densidad de panículas (Marques, 2010) y, en consecuencia, no se distingue la habilidad varietal en este aspecto. Se deduce, por tanto, la escasa relevancia que generalmente se le ha atribuido al ahijado del arroz en su papel en el rendimiento y la eficiencia del cultivo por lo que tampoco se han encontrado estudios donde se caracterice esta fase.

Actualmente, en el Delta del Ebro se cultivan hasta 5 variedades distintas (Català, *et al.*, 2007) (Fig.1). El perfil varietal del Delta del Ebro consiste en variedades tipo japónica de grano medio y con una duración de ciclo media entre 120 y 140 días, por lo que se prevé una escasa diversidad en el comportamiento del ahijado del arroz en estas variedades y condiciones de cultivo.

La falta de bibliografía previa sobre el ahijado en nuestras condiciones requiere que una parte importante del estudio se dedique a la caracterización del ahijado del arroz en el sistema de cultivo del Delta del Ebro, con siembra directa en campos inundados y bajo el perfil varietal utilizado en esta zona arrocerá. La caracterización de ahijado debe consistir en un conocimiento profundo del ahijado: su calendario, distinción de sus diferentes fases (especialmente la productiva de la improductiva), evolución del número de tallos y de su productividad, eficiencia, variabilidad de sus componentes, influencia de esta fase en el rendimiento y el efecto de diferentes prácticas agronómicas.

La localización de los nudos que van a desarrollar tallos y la proporción que será productiva es fundamental para la comprensión de la formación del rendimiento. El ahijado precoz, que es el que se desarrolla durante las

primeras fases, es generalmente el que acaba siendo productivo ( Matsuo y Hoshikawa, 1993), por tener más tiempo y menos competencia por los recursos. Matsuo (1951) (citado en Gendua, *et al.*, 2009) observó que los tallos en posiciones más bajas favorecían el rendimiento del arroz a través de las diferencias mostradas en el número máximo de tallos. Yoshida, *et al.* (1982) observaron como los tallos más precoces tenía más cantidad de raíces y más largas que los tardíos independientemente del orden o posición de los tallos. Por lo tanto, está generalmente establecido que es muy importante promover el desarrollo de los tallos primarios de las posiciones más bajas (Matsushima, 1957, citado en Gendua, *et al.*, 2009). El manejo de agua y la fertilización nitrogenada pueden ejercer influencia en la precocidad del ahijado.

La lámina de agua debilita el desarrollo de las yemas (Yoshida, 1981) y disminuye la oxigenación de las raíces repercutiendo negativamente en el desarrollo vegetativo de las plantas. Existe una fuerte relación entre el sistema radical, el ahijado y el crecimiento de la planta (Matsuo, *et al.*, 1995) e incluso con la capacidad ahijadora de manera que las plantas con mayor habilidad ahijadora suelen tener un sistema radical más corto (Yoshida, *et al.*, 1982). En algunas zonas de Europa y Sudamérica no se realiza el primer riego hasta el inicio del ahijado, promoviendo el desarrollo de las raíces y favoreciendo el ahijado precoz. Sin embargo, esta práctica en el Delta del Ebro no es posible por los elevados niveles de salinidad en el suelo. La salinidad es el principal factor limitante del rendimiento del arroz en el Delta del Ebro (Català y Fosch, 1997). Esta limitación conlleva la práctica del riego por inundación manteniendo lámina continua de agua durante todo el ciclo para mantener la capa salina por debajo de la rizosfera. Por tanto, se planteó la posibilidad de aplicar un sistema de riego intermitente que favoreciera la oxigenación de las raíces y estimulara

el ahijado pero que, a la vez, previniera los efectos negativos de la salinidad. Por otro lado, el sistema de riego intermitente ha sido estudiado y citado en diversos estudios y propuesto como sistema que promueve el crecimiento repercutiendo en una mejora del rendimiento (Lin, *et al.*, 2005). Un sistema de riego parecido se incluye en el *System of rice Intensification* (SRI). Este sistema se desarrolló en Madagascar a principios de los años 80 por Fr. Henri de Laulané, quien trabajó juntamente con los agricultores para desarrollar un sistema de producción de arroz que permitiera incrementar el rendimiento. En este sistema se incluyen diferentes prácticas que aportan las mejores condiciones para la planta de arroz y que han permitido alcanzar rendimientos hasta 5 y 10 t x ha<sup>-1</sup> cuando se partía de valores alrededor de las 2 t x ha<sup>-1</sup> (Uphoff, 1999). Con el SRI, los campos de arroz durante la fase vegetativa sólo se riegan para mantener la humedad del suelo con el objetivo de mantener la aireación y facilitar el desarrollo radical. El sistema de riego intermitente también se considera como una de las tecnologías prometedoras para la reducción del consumo de agua en el cultivo del arroz por su alta productividad del agua sin penalización en el rendimiento (Virk, *et al.*, 2004). El uso de este sistema de riego durante la fase vegetativa podría permitir un ahorro de agua entorno al 17%. Esta consideración es muy importante dada la imperiosa necesidad en la mejora del uso eficiente del agua en cultivos extensivos en la región Mediterránea (Katerji, *et al.*, 2008). En este sentido, se han realizado diversos estudios comparando este sistema con la inundación continua, pero enfocándolo como una tecnología de riego para el ahorro de agua sin disminución del rendimiento (Lu, *et al.*, 2001; Gun Won, *et al.*, 2005) pero no como una oportunidad para incrementarlo. El objetivo de este estudio no era la reducción del consumo de agua por lo que no se evaluó este parámetro.

La influencia de la fertilización nitrogenada en el ahijado ha sido estudiada en diversas ocasiones pero mayoritariamente comparando diferentes dosis de fertilización. En general, los resultados obtenidos apuntan que la aportación abundante de nitrógeno estimula el ahijado (Yoshida, 1981). En la presente Tesis se ha optado por el estudio del momento del fraccionamiento del abono nitrogenado en la aplicación correspondiente al estadio del ahijado. En 1998, los productores catalanes de arroz se acogieron masivamente (el 96% del total) a las ayudas agroambientales de la Unión Europea de fomento de métodos de producción agraria más respetuosos con el medio ambiente, aplicados a zonas húmedas incluidas en el Convenio Ramsar, como es el caso del Delta del Ebro. Una de estas prácticas consistía en la limitación de la aplicación de fertilización nitrogenada a dosis máximas de 120 UF de N x ha<sup>-1</sup> en variedades de grano corto y de 150 UF N x ha<sup>-1</sup> en variedades de grano largo. Debido a esta coyuntura medioambiental, se descartó el planteamiento del uso de diferentes dosis de nitrógeno. En el Delta del Ebro, cuando se realiza la fertilización nitrogenada fraccionada, la cobertera del ahijado suele realizarse a mediados de junio, cuando el cultivo está a mediados del ahijado. Esta práctica podría favorecer el desarrollo de tallos tardíos que por falta de tiempo y por tener lugar en un entorno más competitivo tienen un menor potencial productivo.

La fase de establecimiento de de la plántula también influye en la consecución de un ahijado prematuro, contribuyendo a la vigorosidad precoz del cultivo (Pasquin, *et al.*, 2008) permitiendo el desarrollo de las yemas en posiciones más bajas de la planta. El estímulo del ahijado anticipado bien mediante prácticas agronómicas o bien a través de la vigorosidad del cultivo implica un rápido y amplio desarrollo vegetativo de la planta y del cultivo por la abundante producción de tallos y en consecuencia, un rápido cierre de la

cubierta foliar. No obstante, la pertinencia del crecimiento vegetativo profuso ha sido discutida por diversos estudios. Algunos de ellos han concluido que un crecimiento vegetativo excesivo resulta perjudicial para el rendimiento del cultivo por el elevado grado de competitividad intraespecífica y por representar un desperdicio de asimilados (Schnier, *et al.*, 1990; Dingkuhn, *et al.*, 1990). Al contrario, otros autores han observado una relación positiva entre el desarrollo vegetativo y el rendimiento (Pasuquin, *et al.*, 2008) a pesar de los fenómenos de competencia intraespecífica establecidos y más aún con el uso de variedades resistentes al encamando (San-oh, *et al.*, 2004). En el cultivo del arroz del área mediterránea, según nuestro conocimiento, no se han realizado estudios para contrastar esta condición ni para delimitar a partir de qué momento este suceso podría tener lugar o, lo que es lo mismo, hasta cuándo y en qué condiciones agronómicas el cultivo del arroz puede producir tallos sin repercusiones negativas en el rendimiento. Además, ante esta situación que previsiblemente tendrá lugar, se ha planteado cómo remediarse y a través de qué mecanismos evitar la sobreproducción vegetativa y cómo puede repercutir en el rendimiento. Para evitar el crecimiento vegetativo excesivo se debe interrumpir el ahijado y el momento viene determinado por el inicio del ahijado improductivo. Diferentes procesos se pueden desencadenar a partir de la intervención del ahijado y de la subsecuente reducción de la densidad máxima de tallos. La primera posibilidad planteada es conseguir un aumento del peso de las panículas y consecuentemente del rendimiento de la planta y del cultivo por disponer de más recursos al reducir la competencia entre los tallos. Otra opción sugerida es la reducción de la densidad de panículas que posteriormente será ampliamente compensada por un mayor número de granos por panícula trascendiendo en el rendimiento final. La última posibilidad trazada consiste en un aumento de la densidad de panículas pero

sin una reducción posterior en su tamaño por efectos compensatorios porque se ha limitado la competencia. Nótese que la primera posibilidad puede presentarse junto con las dos siguientes, mientras que las dos últimas se excluyen. La segunda de ellas implica que el control del ahijado no interfiere en la mortalidad de los tallos ya que para un menor número máximo de tallos, la densidad de panículas también es inferior respecto el control. En cambio, la primera y tercera implican un descenso de la senescencia que permitirá igualar o superar el número de panículas respecto el control. En los tres casos, un control del ahijado implica una distribución más eficiente de los asimilados (Lafarge, *et al.*, 2004b) aunque si la mejora en el rendimiento pasa por una reducción de la mortalidad, indicará que no hay un reaprovechamiento de los asimilados procedentes de tallos senescentes (Lauer y Simmons, 1988) o que si lo hay el balance es negativo (Berry, *et al.*, 2003).

Por otro lado, la densidad de planta es uno de los factores agronómicos más influyentes en el ahijado del arroz. El ahijamiento otorga una gran plasticidad al cultivo del arroz y a los cereales en general aportando una gran estabilidad en el rendimiento en diferentes densidades de planta. Sin embargo, un exceso de planta puede conllevar problemas de enfermedades y encamado mientras que un déficit en el número de plantas puede provocar que no haya sumidero suficiente para la captación óptima de los recursos.

Por otro lado, la densidad de planta es uno de los factores agronómicos más influyentes en el ahijado del arroz (Yoshida, 1981). El conocimiento de una densidad óptima de plantas garantizaría la eficiencia del cultivo por la optimización del rendimiento a través de la reducción de inputs y de la estabilización del comportamiento del cultivo.

## 1.2.2 Objetivos

Con todo ello, se trazó el plan de experimentación en dos fases y a través de tres experimentos. La primera fase tiene como objetivo el estudio del efecto de la densidad de planta en el ahijado considerando también el factor varietal (Experimento 1), la caracterización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro (Experimento 2), el estudio de los factores que pueden promover el ahijado precoz (Experimento 2) y el efecto de todas estas condiciones en el rendimiento. El objetivo de la segunda fase ha sido la evaluación de un sistema mediante el manejo del agua para la interrupción del ahijado y su repercusión en el rendimiento final (Experimento 3).

Los principales objetivos definidos fueron:

- Conocer las principales características del ahijado del arroz cultivado en el Delta del Ebro: cronología de la fase y sus estadios, arquitectura de la planta según la estructura jerárquica del ahijado, densidad media de tallos y panículas producidos, repercusión de la fase en el rendimiento del cultivo y influencia de factores agronómicos y de la variedad en su desarrollo.
- Determinación del sincronismo entre el desarrollo foliar y el ahijado en el arroz cultivado en el Delta del Ebro para facilitar el manejo y precisión de las prácticas agronómicas.
- Determinación del periodo de desarrollo de tallos productivos e improductivos.

- ◆ Caracterización productiva del ahijado: rendimiento y componentes del rendimiento a nivel de planta y, especialmente, de orden del tallo. Influencia varietal y de los factores agronómicos considerados.
- ◆ Caracterización de la contribución al rendimiento de la planta de los tallos según su orden.
- ◆ Determinación de las prácticas agronómicas que permitan estimular el ahijamiento precoz.
- ◆ Determinación de la dosis de siembra óptima para la optimización del ahijado y su repercusión en el rendimiento.
- ◆ Evaluación de un método basado en el manejo de agua que permita interrumpir el ahijamiento.
- ◆ Evaluación de la repercusión en el rendimiento de esta técnica.





## **2. MATERIAL Y MÉTODOS**



## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en los campos experimentales de IRTA (*Institut Recerca i Tecnologia Agroalimentària*) en Amposta (Tarragona) durante los años 2006 hasta 2009.

El presente estudio se fundamentó en dos líneas de investigación a partir de las cuales se definieron los diferentes experimentos. La primera de ellas consistía en la caracterización del ahijamiento y en el estudio de su comportamiento en diferentes condiciones de manejo de cultivo: fertilización nitrogenada, densidad de planta y manejo de agua. También se consideró la influencia del genotipo en el ahijamiento. Los objetivos principales de esta línea consistían en poder describir el proceso bajo estas condiciones y distinguir cuáles de ellas resultaban más favorecedoras para el fomento del ahijamiento productivo y la limitación del improductivo. La segunda línea pretendía la introducción de una técnica de cultivo que permitiera intervenir en el proceso para conseguir mejorar la eficiencia del ahijamiento y del cultivo en general y, en última instancia, que esta mejora pudiera trascender en el rendimiento.

Para la evaluación de la influencia de diferentes factores agronómicos en el ahijamiento, se llevaron a cabo dos experimentos desde 2007 hasta 2009. En el primero de ellos, se estudiaron los factores dosis de siembra y variedad (Experimento 1) y en el segundo, los factores manejo de agua, fertilización nitrogenada y densidad de planta (Experimento 2). El segundo eje de la investigación se basó en un único experimento de dos años de duración (2008-2009) en el que se compararon, bajo dos dosis de siembra, diferentes técnicas de manejo de agua que permitieran la interrupción del ahijamiento (Experimento 3).

## 2.1 EXPERIMENTOS

A continuación se describen los experimentos llevados a cabo durante los tres años de estudio, detallándose los principales objetivos definidos para cada uno de ellos, los factores y sus niveles, así como las modificaciones que se fueron incorporando.

### Experimento 1: Dosis de siembra y variedades

Las dos variedades escogidas para el desarrollo de este experimento fueron Gleva y Tebre. La selección se basó en criterios de representatividad de la zona arroceras y de duración de ciclo, siendo Gleva una variedad de ciclo más corto (120 días) que Tebre (140 días). En la tabla 1 se muestran las principales características de las dos variedades según las empresas distribuidoras:

**Tabla 1 Principales características de las dos variedades Gleva y Tebre.**

Carácter	Gleva	Tebre
Duración del ciclo	125-130 días	135-145 días
Altura media de la planta	50 cm	100-110 cm
Resistencia encamado	alta	media
Resistencia enfermedades	media alta	buena
Tipo de grano	perlado	perlado
Clasificación del grano	medio	medio
Peso mil granos (cáscara)	36.9 g	34.0 g
Dosis siembra	225 kg semilla x ha <sup>-1</sup>	170-200 kg semilla x ha <sup>-1</sup>

Fuente: Semillas Certificadas Castells S.L (Gleva) y Copsemar (Tebre)

En cuanto a las dosis de siembra, en 2007 se evaluaron 6 dosis diferentes, de 60 hasta 310 kg semilla x ha<sup>-1</sup> en intervalos de 50 kg. En 2008 y 2009, el número de tratamientos se redujo hasta 4 empezando por 80 y hasta 320 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, en intervalos de 80 kg (Tabla 2).

**Tabla 2 Dosis de siembra (kg semilla x ha<sup>-1</sup>) utilizada en el experimento 1 según el año de experimentación.**

2007		2008-2009	
Código tratamiento	Dosis de siembra	Código del tratamiento	Dosis de siembra
D1	60	D1	80
D2	110	D2	160
D3	160	D3	240
D4	210	D4	320
D5	260		
D6	310		

## Experimento 2: Manejo de agua-Fertilización nitrogenada-Dosis de siembra

Se pretendía evaluar la influencia de estos factores sobre el ahijamiento así como posibles efectos de interacción entre ellos. De cada factor se estudiaron dos niveles diferentes (Tabla 3):

- *Manejo de agua.* Durante el periodo del ahijado, se comparó una lámina continua de 7 cm de profundidad (W1) con un sistema de riego intermitente con láminas de 3 cm (W2).

- *Fertilización nitrogenada.* El objeto de estudio de este factor es la influencia del momento de aplicación del fertilizante nitrogenado de cobertera sobre el ahijamiento. Se comparó una aplicación precoz (N1), en estadio de 3.5-4 hojas (estadio BBCH 13-14), con una aplicación tardía (N2), en el estadio de 8-9 hojas (estadio BBCH 18-19), que es la habitual de la zona. La dosis final fue la misma para los dos tratamientos: 120 UF N x ha<sup>-1</sup> repartidas en tres fracciones de 40 UF N x ha<sup>-1</sup>.

• *Dosis de siembra.* Los dos niveles del factor consistían en una dosis baja de siembra de 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup> (D1) y una de superior de 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup> (D2).

Los resultados obtenidos en los años 2007 y 2008 indicaron que no había influencia de la dosis de siembra ni interacción con ninguno de los otros factores, por lo que en 2009 se excluyó este factor del estudio.

**Tabla 3 Resumen de los factores y sus diferentes niveles estudiados en el experimento 2.**

Factor	Manejo de agua		Fertilización nitrogenada		Dosis de siembra	
Objeto de estudio	sistema de riego y profundidad de lámina		momento aplicación de la fracción del ahijamiento		densidad de planta a través de dosis de semilla	
Código tratamiento	W1	W2	N1	N2	D1	D2
Niveles del factor	Lámina continua 7 cm	Riego intermitente 0-3 cm	Fertilización precoz (3.5 hojas)	Fertilización tardía (8.5 hojas)	160 kg semilla x ha <sup>-1</sup>	210 kg semilla x ha <sup>-1</sup>
Años de estudio	2007-2009		2007-2009		2007-2008	

### Experimento 3: Control del ahijamiento mediante el manejo del agua

Se pretendía poner a punto una técnica de cultivo basada en el manejo de agua capaz de interrumpir el ahijamiento improductivo para poder aumentar el rendimiento. Por tanto, el objetivo de este experimento era evaluar si las diferentes prácticas de manejo de agua estudiadas permitían esta interrupción y en caso de ser así, comprobar si repercutía en la eficiencia del ahijamiento y del cultivo en general.

Para poder aplicar las posibles técnicas, primero era necesario saber en qué momento debían utilizarse. Para ello, se necesitaba información previa sobre el comportamiento del ahijamiento y poder diferenciar los nudos productivos de los improductivos. Por tanto, no fue hasta 2008 que se pudo empezar este experimento utilizando los resultados obtenidos durante los dos años anteriores.

Se comparó un tratamiento testigo (TES) con dos métodos para la interrupción del ahijado cuyos momentos de aplicación tendrían lugar desde el inicio del ahijamiento improductivo hasta el inicio de panícula (Tabla 4). Estos métodos fueron:

- Aumento de la lámina de agua (ALM) hasta 1 ó 2 cm por encima de la aurícula de la última hoja desarrollada.
- Drenaje de las parcelas (DR).

Los malos resultados obtenidos en 2008 en el tratamiento de drenaje de las parcelas junto con la dificultad que podría representar la aplicación de este método por parte de los agricultores, nos condujeron a descartar este tratamiento como método de control en 2009.

**Tabla 4 Resumen de los factores y sus diferentes niveles comparados en el experimento 3.**

Niveles de factor	Código del tratamiento	Años de estudio
Testigo	TES	2008-2009
Aumento lámina	ALM	2008-2009
Drenaje	DR	2008

## 2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Según el año y el número de factores estudiados, se utilizaron dos tipos de diseños experimentales: parcelas divididas (Split-plot) y bloques al azar. El diseño de partida de todos los experimentos fue en split-plot y en algunos experimentos se sustituyó por la estructura de bloques al azar cuando se excluía alguno de los factores.

A continuación se describe el diseño para cada uno de los experimentos llevados a cabo durante el periodo de estudio.

### Experimento 1: Dosis de siembra y variedades

Para este experimento se utilizaron un total de 8 parcelas de una superficie aproximada de 100 m<sup>2</sup>, distribuidas en 4 repeticiones. Por tanto, cada repetición estaba formada por dos parcelas. En 2007 y 2008, el experimento se estructuró en un diseño de parcelas divididas donde la parcela elemental era el factor variedad y la subparcela la dosis de siembra. En 2007, el factor secundario constaba de 6 niveles diferentes, por lo que cada parcela se dividió en 6 subparcelas de 13.5 m<sup>2</sup> (3 m x 4.5 m). En 2008, con la reducción del número de dosis de semilla, se dividieron en 4 subparcelas de 22 m<sup>2</sup> (4.6 m x 4.8 m).

Finalmente, en 2009, con la exclusión del factor variedad, el diseño experimental consistió en bloques al azar con 4 parcelas por repetición correspondientes a los 4 tratamientos de dosis de semilla. Para hacer más fáciles los trabajos del cultivo tales como la fertilización, el control del agua, la aplicación de fitosanitarios, etc., cada parcela se dividió en dos subparcelas de superficie de 20 m<sup>2</sup> (4.3 m x 4.7 m) separadas entre ellas por canales estrechos

(40 cm de ancho). Para efectos de análisis de datos, se consideró una única parcela.

## **Experimento 2: Manejo de agua-Fertilización nitrogenada-Dosis de siembra**

El experimento 2 estaba formado por un total de 16 parcelas de 100 m<sup>2</sup>, con 4 parcelas por repetición. En 2007 y 2008, también se utilizó el diseño de parcelas divididas y cada repetición constaba de 4 parcelas elementales correspondientes a los cuatro tratamientos resultantes de la combinación agua-nitrógeno. Cada parcela elemental se dividió en 2 subparcelas de 42 m<sup>2</sup> (4.3 m x 9.1 m) para el factor secundario (dosis de siembra). En 2009, se pasó al diseño de bloques al azar por exclusión del factor dosis de siembra, pero se mantuvieron las 4 parcelas por repetición. Por los mismos motivos de facilitación de los trabajos de campo expuestos para el experimento 1, las parcelas se dividieron en 2 subparcelas de 42 m<sup>2</sup> con el mismo tratamiento. Igualmente, para efectos de análisis de datos, se consideró una única parcela.

## **Experimento 3: Control del ahijamiento mediante el manejo del agua**

En este caso, tanto la estructura del diseño (parcelas divididas) como las superficies de las parcelas y subparcelas se mantuvieron para los dos años de estudio. Había un total de 12 parcelas que se dividían en dos subparcelas de 16 m<sup>2</sup> (4 m x 4 m). En 2008, el experimento constaba de tres tratamientos principales (técnica de control del ahijamiento) y 2 sub-tratamientos (dosis de siembra). Por tanto, el experimento contaba tres repeticiones de 4 parcelas elementales cada una de ellas. En 2009, se eliminó uno de los niveles del factor

principal por lo que el experimento pasó a estar compuesto de 6 repeticiones de 2 parcelas elementales cada una de ellas.

## 2.3 UNIDADES EXPERIMENTALES

El contenido de esta tesis se estructura a partir de los resultados obtenidos a partir de cada una de estas unidades experimentales para los diferentes experimentos.

En cada experimento distinguieron 3 unidades experimentales según el tipo de información buscada. Fueron denominadas como subparcela, marco de monitorización de las plantas y microparcelas de dinámica poblacional. A continuación se describen estas tres unidades experimentales así como las valoraciones realizadas en ellas y la metodología seguida.

### 2.3.1 Subparcelas

La imagen 1 muestra las parcelas del experimento 2 en el que se distinguen las subparcelas delimitadas por estrechos canales.



**Imagen 1 Parcelas y subparcelas correspondientes al experimento 2**

En las subparcelas se realizaron las siguientes valoraciones:

a) Densidad de planta

Se realizaban 4 tiradas de aros de 0.125 m<sup>2</sup> en cada subparcela en los que se contaba el número de plantas. Se aumentaba el número de tiradas hasta 6 o más cuando se observaba heterogeneidad en los valores.

b) Determinación de los estadios fenológicos

Se determinaron los siguientes estadios: emergencia, inicio de panícula, zurrón, espigado y maduración. Los momentos de cada estadio fenológico se determinaban cuando el 50% del cultivo había alcanzado el estadio correspondiente, excepto para la maduración, con un 90% de los granos maduros. Los criterios para definir el inicio de cada estadio se describen a continuación:

- Emergencia: plantas en estadio de 1-1.5 hojas (BBCH 11).
- Inicio panícula: panículas de 2 mm (BBCH 32).
- Zurrón: la aurícula de la última hoja supera la de la hoja anterior (BBCH 39).
- Espigado: la punta de la panícula supera en 2 cm la aurícula (BBCH 51).

c) Rendimiento.

En 2007 y 2008 se segaron manualmente áreas previamente delimitadas en el centro de las subparcelas de 6 m<sup>2</sup>. En 2009, con la adquisición de una cosechadora de tamaño reducido se pudo realizar la siega mecánicamente a toda la superficie de la subparcela. Cuando la siega era manual, se separaba el grano con una trilladora e inmediatamente después se pesaba la producción obtenida. La cosechadora tenía integrado un sistema de trillado.

Para el ajuste del rendimiento al 14% de humedad, se separaban muestras de aproximadamente 100 gramos y se secaban en la estufa durante 48 horas a 130°C. La diferencia entre el peso fresco y el peso seco permitía el cálculo del contenido de humedad del grano en el momento de la cosecha y el posterior ajuste de la producción al 14%.

#### d) Componentes del rendimiento

- *Densidad de panículas (NP)*. Se hacían 4 tiradas de 0.116 m<sup>2</sup> en cada subparcela donde se contaba el número de panículas. El número de tiradas se aumentaba hasta 6 si se observaba demasiada heterogeneidad en los valores.

- *Tamaño de las panículas o número de granos por panícula (NGP)*. El mismo día de la siega se cortaban 30 panículas al azar. Posteriormente, se desgranaban con la ayuda de una trilladora de laboratorio y se pesaban los granos. Conociendo el peso de mil granos (PMG) se podía calcular el número de granos por panícula utilizando la siguiente fórmula:

$$NGP = \frac{\text{Peso granos 30 panículas}}{\text{PMG}}$$

- *Peso mil granos (PMG)*. Se pesaron 4 muestras de 200 granos de cada microparcela. Los granos se contaron manualmente en 2007 y con un contador de semillas en los años posteriores.

- *Fertilidad*. Se calculaba con la siguiente fórmula:

$$\text{Fertilidad (\%)} = \frac{\text{Peso granos llenos}}{[\text{Peso total granos (llenos+vacios)}]} \times 100$$

Hasta 2008, los granos vacíos se separaban de los llenos manualmente mientras que a partir de 2009, con un separador de granos vacíos.

### Datos climáticos

Con el objetivo de evaluar la influencia del manejo de agua sobre la temperatura del agua y suelo y su subsecuente efecto en el ahijado del arroz. Por lo tanto, se instalaron en subparcelas del experimento sensores de temperatura en los dos manejos de agua: W1 (lámina continua a 7cm) y W2 (riego intermitente a 3 cm). El equipo constaba de unos sensores de temperatura (modelo *TMC6-HD*) conectados a registradores de datos (modelo *HOBO® U12*) que almacenaban las temperaturas capturadas cada dos horas desde la siembra hasta la cosecha. En 2007, los equipos se colocaron en dos repeticiones para cada tratamiento de agua y con tres sensores por subparcela. Cada registrador almacenaba los datos de tres sondas distintas. Los niveles de instalación de cada sonda fueron: a 3 cm sobre el nivel del suelo (+3cm), sobre la superficie del cultivo (0 cm) y a 3 cm de profundidad del suelo (-3cm). Las dos primeras registraban la temperatura del agua y la última la del suelo. En el momento del análisis de la temperatura, se observó que la sonda +3cm en realidad no medía la temperatura del agua en el tratamiento de riego intermitente (W2) porque pasaba una parte importante del tiempo sin estar cubierta de agua a causa del propio manejo. En consecuencia se decidió prescindir de este nivel y a partir de 2008 sólo se instalaban las sondas a los niveles 0 y -3cm. En 2008 y 2009, la instalación tuvo lugar en tres repeticiones de los dos manejos de agua. La periodicidad de captura de datos fue la misma.

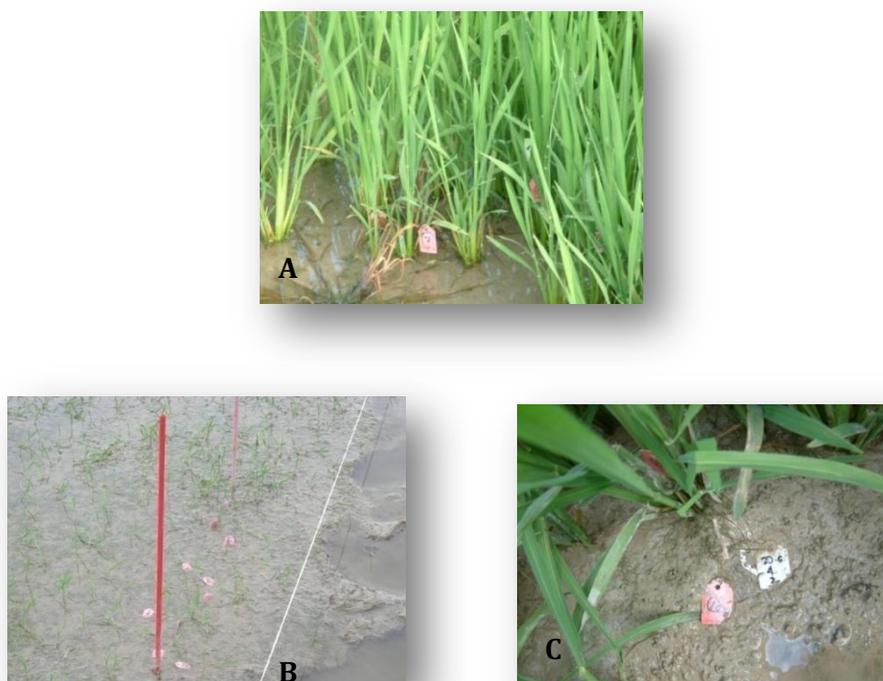
Los datos climáticos ambientales se obtuvieron de la estación meteorológica instalada a unos 100 m de los campos experimentales y que pertenece a la red de estaciones agrometeorológicas de la Generalitat de Catalunya.

### **2.3.2. Marco de monitorización de las plantas**

El objetivo era el seguimiento del ahijamiento y desarrollo foliar de las plantas así como la evaluación de su rendimiento y componentes según la posición de las panículas. Con estas valoraciones se obtendría la siguiente información: evolución del número de tallos y hojas en el tallo principal en el tiempo así como el momento de emergencia, identificación, productividad y características productivas de los tallos según jerarquía y posición.

Se identificaron y marcaron 12 (año 2007) y 10 (años 2008 y 2009) plantas por cada subparcela utilizando etiquetas de plástico con un hilo (Imagen 2) que permitían rodear el tallo y permanecer en él hasta el momento de la siega. Estas plantas se buscaban en una pequeña área a unos 30 cm de los canales que rodeaban las parcelas para así poder realizar la monitorización correctamente pero alejándonos de los bordes. La selección consistió en la búsqueda de diez (o doce) plantas que fueran representativas del estado general del cultivo en la subparcela. Para poder extrapolar los resultados de estas valoraciones al resto de la subparcela, las plantas debían crecer en un entorno con igual densidad de planta. Para ello, se utilizaron unos marcos de plástico de 0.18 m<sup>2</sup> dentro de los cuales se identificaron y marcaron las plantas y se trasplantaron o arrancaron plantas hasta conseguir densidades parecidas al exterior. Para evitar efectos del trasplante en el posterior ahijamiento de los individuos, no se hizo el seguimiento en ninguna de las plantas trasplantadas. En 2007, la densidad de planta en el marco de seguimiento correspondía a la densidad obtenida en la

misma subparcela donde se ubicaba el marco. Para facilitar el análisis e interpretación de los resultados, en 2008 y 2009, la densidad fue la misma en todos los marcos y se utilizó la densidad media del experimento distinguiendo los tratamientos D1 y D2 en el caso del experimento 2.



**Imagen 2. Plantas de monitorización (A, B) con etiquetas de plástico identificativas en el marco de seguimiento del ahijado (C).**

Los tallos primarios se identificaban utilizando el mismo tipo de etiquetas que en las plantas, pero con distinto color, y en ellas se anotaba su posición, la fecha en la que se vio por primera vez y el número de hojas (Imagen 2B). Al mismo tiempo, en las hojas de campo se anotaba el número de hojas en el tallo principal (TP), número de hojas de los tallos en el momento de su primer

registro y el número total de tallos por planta (incluyendo el TP). Se consideraba que un tallo había emergido cuando presentaba como mínimo una hoja completamente desarrollada. Sólo se marcaban los tallos primarios. El número de tallos secundarios se calculó a través de la diferencia entre el número total de tallos por planta y el número de tallos primarios. En ningún caso se observaron tallos terciarios. El registro del número de hojas en los tallos primarios en el momento de su primera detección permitió estimar su fecha de emergencia considerando un filocrón o intervalo de tiempo entre emergencia de hojas sucesivas (Wilhelm y McMaster, 1995a) de 3 días x hoja<sup>-1</sup> (Nemoto, *et al.*, 1995).

El seguimiento empezó en el estadio de 3 hojas y se realizaba tres veces cada dos semanas durante la fase del ahijamiento activo y semanalmente desde el momento del máximo número de tallos hasta el espigado.

A final del ciclo, las plantas marcadas se segaron a mano, cortándose a nivel de raíces y separadamente del resto del cultivo. Las plantas y panículas se podían identificar fácilmente con las etiquetas de plástico y cada una de ellas fue procesada en el laboratorio. Los parámetros evaluados para cada panícula fueron: caracteres morfológicos (altura del tallo y longitud de la panícula), rendimiento y sus componentes (número de panículas por planta, peso de los granos y el número de granos totales y llenos) y biomasa del tallo y granos por separado. La altura del tallo se midió desde la base de los tallos hasta la punta de la panícula y la longitud de la panícula era la distancia entre el nudo y final de la misma. Para la biomasa, las muestras se pesaron después de permanecer en la estufa de desecación durante 72 horas a 75°C.

En el experimento 3 hubo ciertas variaciones respecto los experimentos 1 y 2. En 2008, se marcaron 8 plantas en dos de las tres repeticiones mientras que en 2009 se monitorizaron 10 en tres repeticiones. Además, en este mismo año, dos días después de la aplicación del tratamiento de agua se aumentó el número de plantas marcadas en D1 hasta 15, para poder aumentar la muestra de plantas con los tallos T5 y T6 y garantizar de este modo la evaluación de la influencia del tratamiento en estos tallos. Esta modificación tuvo lugar tras observar que este año la emergencia de estas dos posiciones era relativamente baja comparada con los años anteriores.

La monitorización del número de hojas y número de tallos en las plantas se realizó de la misma forma que en los otros dos experimentos pero no se etiquetaban ni identificaban los tallos primarios. En el momento de la aplicación del tratamiento de agua, se realizaron diferentes determinaciones en los dos años de experimentación. En 2008, se distinguieron con etiquetas de diferentes colores los tallos con más de dos hojas de los que presentaban menos de dos, en el momento del inicio del tratamiento. En 2009, se etiquetaron los tallos T5 y T6, dos y siete días después del tratamiento.

Las valoraciones realizadas después de la cosecha fueron las mismas que en los otros experimentos pero sin diferenciar las panículas según su posición. Las panículas se distinguían según el número de hojas en el inicio del tratamiento en 2008 y las panículas P5 y P6 del resto en 2009.

### **2.3.3 Microparcelas de dinámica poblacional**

Los resultados esperados de esta unidad experimental eran: conocer la evolución de número de tallos por unidad de superficie a lo largo del cultivo,

localización en el tiempo de las diferentes fases del ahijamiento (inicio y final, máximo ahijamiento, ahijado improductivo) y, a partir del 2008, relación del comportamiento del ahijado con el rendimiento y sus componentes.

En las subparcelas, se delimitó una pequeña superficie para el seguimiento poblacional que fue denominada como microparcela y considerada como unidad experimental. Se colocó una microparcela en cada subparcela de dos (2007) y tres repeticiones (2008 y 2009) de cada experimento. Consistían en aros de plástico de 0.126 m<sup>2</sup> con algunas pequeñas perforaciones para permitir el flujo de agua y así poder garantizar las mismas condiciones dentro y fuera de los mismos (Imagen 3). Se sembraron siguiendo la dosis de siembra correspondiente al tratamiento de la subparcela pero de forma separada, por lo que previamente se calculó la cantidad de semilla pertinente.



### **Imagen 3 Microparcela de dinámica poblacional del ahijado**

En el estadio de cuatro hojas, cuando el cultivo ya se había establecido, se contó el número de plantas por aro. En 2009, para facilitar el posterior análisis e interpretación de los resultados, se determinó un número fijo de plantas por

aro a partir de los datos obtenidos en las subparcelas, por lo que se extrajeron o añadieron plantas según la densidad prefijada. Siguiendo la misma periodicidad que en el seguimiento de las plantas, el número de tallos por aro se registró tres veces cada dos semanas hasta el momento de ahijado máximo y semanalmente hasta el espigado. La última valoración tuvo lugar en el estadio de maduración, cuando el número de panículas ya estaba fijado.

A partir del 2008 y con el objetivo de aumentar la precisión de los resultados sobre la relación entre el comportamiento del ahijado y el rendimiento, las plantas de estas microparcelsas fueron segadas a mano y separadas del resto de la cosecha. Sobre ellas se realizaron las valoraciones para la determinación del rendimiento y sus componentes y los datos obtenidos son los que se muestran en el apartado correspondiente de Resultados (*3.3 Dinámica poblacional del ahijado y su relación con el rendimiento y los componentes del rendimiento*). La metodología fue la misma que la descrita en el apartado de las subparcelas (2.3.1).

## 2.4 ANÁLISIS DE DATOS

El análisis estadístico de los datos se realizó de forma predominante con el programa estadístico SAS (versiones 9.1 y 9.2) mediante los diferentes procedimientos y métodos que ofrece. Ocasionalmente, también se utilizó con la herramienta de análisis de datos del programa EXCEL (versiones 2003 y 2007) para el análisis de regresión lineal.

Los parámetros del análisis de los modelos de la varianza se estimaron utilizando el método de la máxima probabilidad del residuo (REML: *residual maximum likelihood*) utilizando el programa SAS/MIXED (versiones 9.1 y 9.2).

Para la separación de medias se utilizaron el test de Duncan y el test de la mínima diferencia significativa (LSD) a niveles de significación del 95%.

En el apartado del desarrollo foliar (3.2.1), la aparición de las hojas se describió mediante la regresión del número de hojas con los grados día (GD) desde la emergencia de las plántulas. Los GD se calcularon según el método 1 de McMaster y Wilhelm (citado en McMaster y Wilhelm, 2003):

$$GD = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} - T_{base}$$

Donde,

T<sub>max</sub> y T<sub>min</sub> son temperaturas diarias máximas y mínimas, respectivamente. Como T<sub>base</sub> (temperatura base) se utilizó 8°C (Yin y Kropff, 1996).

Para los análisis de regresión, las funciones exponenciales fueron transformadas en funciones lineales mediante la siguiente conversión:

$$y = a * e^{bx} \rightarrow \ln y = \ln a + bx$$

La significación y niveles de ajuste fueron evaluados mediante el procedimiento Proc Reg. Para la validación del modelo del desarrollo foliar mediante el estadístico RMSE (*Root Mean Square Error*).

El análisis de la dinámica del ahijado, consistente en la comparación de las medias en cada fecha de muestreo, se realizó mediante el método estadístico de las medidas repetidas.

La correlación entre el rendimiento, los componentes del rendimiento y los parámetros descriptivos de la dinámica del ahijado se analizó mediante matrices de correlación del coeficiente de Pearson, a través del procedimiento de correlación (Proc Corr) del mismo programa SAS.

Los datos obtenidos en 2006 mostraron pautas sensiblemente diferentes de los derivados de los años posteriores. El diseño experimental y el protocolo seguidos fueron muy similares a los años siguientes y las condiciones climáticas no mostraron diferencias importantes, por lo que la divergencia del comportamiento observado se atribuye a las posibles imprecisiones en las valoraciones realizadas por ser el primer año de experimentación de esta tesis. Por ello, no se consideraron estos datos como resultados propiamente sino que como meros datos preliminares que permitieron, en su momento, trazar tendencias de comportamiento que posteriormente serían mejor definidas.

## **2.5 PRÁCTICAS DE CULTIVO**

### **2.5.1 Laboreo, siembra y prácticas culturales**

En invierno se realizaba un laboreo profundo del suelo con cultivadores. De febrero a mayo, según las condiciones meteorológicas y las del suelo, se realizaba el laboreo superficial con fresadora y seguidamente la nivelación guiada con láser. El último pase antes de la inundación consistía en la distribución del abono con abonadora centrífuga seguida de su posterior incorporación del abono con rotovator.

Después de la inundación, se hizo una segunda nivelación de las parcelas a mano, para conseguir unas condiciones óptimas.

Las semillas se mantenían en remojo durante 48 horas y posteriormente se mantenían 12 horas en condiciones húmedas. Las semillas pre-germinadas se sembraban a mano según la dosis correspondiente a cada parcela. Las microparcels se sembraban por separado del resto de la subparcela. Las siembras tuvieron lugar los días 16, 18, 20 y 8 de mayo de los años 2006 hasta 2009, respectivamente.

La cosecha se realizaba cuando el contenido de humedad del grano en campo presentaba valores del 18 al 22%. El método de estimación era a partir de la diferencia de peso de una muestra de granos después de pasar 48 h en la estufa de desecación a 130°C. Tal y como se ha descrito previamente, los primeros 3 años la cosecha se realizó de forma manual en las tres unidades experimentales: plantas de seguimiento, microparcels y subparcelas. En la subparcela se enmarcaban en el centro áreas de 6 m<sup>2</sup> que eran segadas manualmente. En 2009, se segó toda la superficie de la parcela con cosechadora.

### **2.5.2 Manejo de agua**

El manejo de agua utilizado dependía del estadio del cultivo. A continuación se describe el sistema de riego aplicado en todas las parcelas exceptuando las que recibían un manejo concreto según el tratamiento correspondiente. Todas las variaciones en el sistema de riego se especificarán en el apartado correspondiente a descripción del experimento.

Desde la siembra hasta el inicio del ahijado, se mantuvo una lámina continua de agua de 1 ó 2 cm de profundidad. Durante el ahijamiento y hasta el inicio de panícula, se aplicaba el riego intermitente con láminas de 3 cm. El sistema

consistía en dejar inundar los campos hasta alcanzar los 3 cm, momento a partir del cual se cortaba la entrada de agua y se dejaba que los niveles de agua bajasen hasta conseguir un estado de saturación del suelo. La determinación de este momento se realizaba de visualmente. Los canales de drenaje de las parcelas permanecían siempre cerrados para evitar pérdidas de fertilizante.

A partir del estadio de inicio de panícula, el sistema consistía en lámina continua de agua de 7 cm de profundidad.

Los campos se drenaban unos 15 o 20 días antes de la siega.

### **2.5.3 Abonado**

Para la fertilización nitrogenada, se aplicaron 120 UF N x ha<sup>-1</sup> en tres fraccionamientos de 40 UF x ha<sup>-1</sup> aplicados en fondo, ahijado e inicio de panícula. El tipo de abono utilizado fue urea para la aplicación en fondo y sulfato amónico para las dos coberteras.

Se realizó una única aportación de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en fondo a dosis de 45 UF x ha<sup>-1</sup>. Se aplicaron también 45 UF x ha<sup>-1</sup> de potasio (K<sub>2</sub>O) siguiendo el mismo fraccionamiento que en la fertilización nitrogenada.

La distribución del abono en cobertera en las parcelas fue manual.

### **2.5.4 Control de malezas, plagas y enfermedades.**

Según la población así como el grado de infestación de malas hierbas se procedía al control de las poblaciones con diferentes métodos y materias activas.

Todos los años se realizó una aplicación de herbicida de preemergencia (Oxadiazon, 25%) para el control de arroz salvaje, *Heteranthera sp.* y especies del género *Echinochloa*. En el caso del arroz salvaje, se complementó el control químico con la escarda manual. Después de la aplicación de este herbicida, los campos permanecían inundados una semana hasta la siembra, para evitar problemas de fitotoxicidad en la semilla.

Durante el cultivo, según el nivel de infestación de *Echinochloa* se hacían aplicaciones de Propanil 35% (2007) en estadio de 3 hojas o Cyhalofop-butil 20% (2008 y 2009) a los 20-22 días después de la siembra. Para el control de ciperáceas se aplicaba Bensulfurón-metil 60%.

Para la reducción de población de quironómidos, todos los años se aplicó Malatión 50% excepto en 2009, debido su uso dejó de estar autorizado.

Los tratamientos fungicidas para *Pyricularia grisea* se aplicaron siguiendo las recomendaciones del *Servei de Sanitat Vegetal de les Terres de l'Ebre*, quien a través de su red de alertas advierten de los momentos de mayor riesgo de infestación de la enfermedad. En los momentos requeridos, se trató con Tebuconazol 25% junto con Triciclazol 75% cuando también se observaban síntomas de Helminthosporiosis.

En todos los casos, para la determinación de las dosis aplicadas se seguían las indicaciones del fabricante.





## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 DATOS CLIMÁTICOS**

#### **3.1.1 Datos climáticos ambientales**

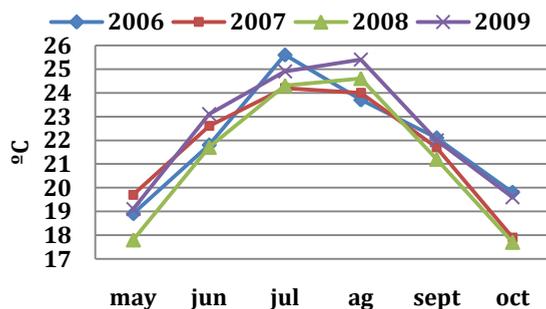
En las cuatro campañas se capturaron los datos climáticos registrados en la estación agrometeorológica situada a pocos metros de los campos experimentales. A continuación se exponen las medias mensuales y generales de temperatura, precipitación, humedad relativa (HR) y radiación global así como la suma total de la precipitación y la radiación global.

**Tabla 5 Datos climáticos mensuales, promedio y suma registrados durante el ciclo del cultivo del arroz en los cuatro años de experimentación (2006-2009).**

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Precip (mm)</b>	<b>HR (%)</b>	<b>Rad Global (mj x m<sup>-2</sup>)</b>
<b>2006</b>	mayo	18,9	16,1	72,0	655,0
	junio	21,8	1,2	76,0	642,8
	julio	25,6	1,6	78,0	617,7
	agosto	23,7	0,0	65,0	703,2
	septiembre	22,1	15,9	75,0	474,5
	octubre	19,8	52,9	76,0	362,3
<b>Promedio 2006</b>		22,0	14,6	73,7	575,9
<b>Suma 2006</b>		--	87,7	--	3455,5
<b>2007</b>	mayo	19,7	18,4	64,0	708,9
	junio	22,6	1,9	71,0	739,1
	julio	24,2	65,5	73,0	790,2
	agosto	24,0	0,5	69,0	651,8
	septiembre	21,7	21,6	72,0	512,9
	octubre	17,9	33,4	72,0	363,9
<b>Promedio 2007</b>		21,7	23,6	70,2	627,8
<b>Suma 2007</b>		--	141,3	--	3766,8
<b>2008</b>	mayo	17,8	176,1	78,0	569,6
<b>2008</b>	junio	21,7	3,2	70,0	748,8
	julio	24,3	14,2	75,0	764,8
	agosto	24,6	23,3	75,0	653,0
	septiembre	21,2	38,0	73,0	472,5
	octubre	17,7	72,6	74,0	328,7
<b>Promedio 2008</b>		21,2	54,6	74,2	589,6
<b>Suma 2008</b>		--	326,8	--	3537,4
<b>2009</b>	mayo	19,1	0,5	71,0	714,6
	junio	23,1	1,7	72,0	759,0
	julio	24,9	0,2	74,0	741,6
	agosto	25,4	14,7	75,0	683,9
	septiembre	22,0	125,5	70,0	475,6
	octubre	19,6	20,5	70,0	413,6
<b>Promedio 2009</b>		22,4	27,2	72,0	631,4
<b>Suma 2009</b>		--	163,1	--	3788,3

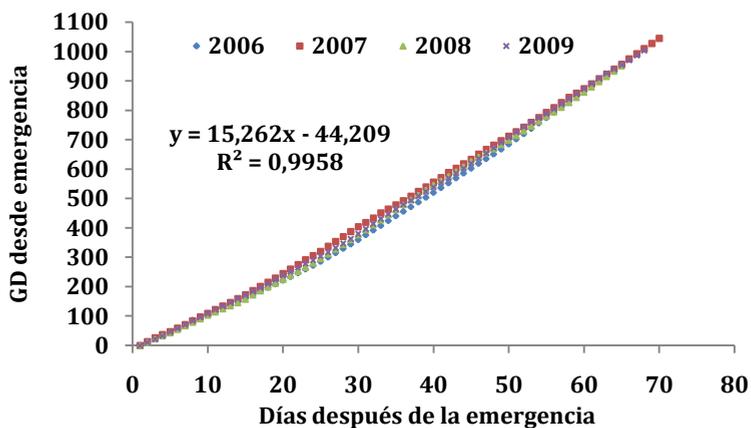
Los datos de la tabla 5 muestran como las temperaturas medias del ciclo obtenidas en los cuatro años fueron muy parecidas, con medias comprendidas entre 21.2 °C y 22.4 °C, con sólo 1.2°C de diferencia entre los valores extremos. En la figura 2 se observa cómo, exceptuando 2006, agosto fue el mes más cálido con medias entre los 23.7 y 25.4 °C. En 2006, el mes más caluroso fue julio (25.6 °C) cuya media fue, a su vez, la mayor registrada en los 4 años. Mayo y octubre fueron los meses más fríos con temperaturas que en ningún caso superaron los 20°C. Los datos de la tabla 5 muestran como las temperaturas medias del ciclo obtenidas en los cuatro años fueron muy parecidas, con medias comprendidas entre 21.2 °C y 22.4 °C, con sólo 1.2°C de diferencia entre los valores extremos. En la figura 2 se observa cómo, exceptuando 2006, agosto fue el mes más cálido con medias entre los 23.7 y 25.4 °C. En 2006, el mes más caluroso fue julio (25.6 °C) cuya media fue, a su vez, la mayor registrada en los 4 años. Mayo y octubre fueron los meses más fríos con temperaturas que en ningún caso superaron los 20°C.

La evolución seguida durante los años 2007 hasta 2009 fue la misma, observándose valores máximos en julio y agosto que descendieron en septiembre. En 2006, la forma de la función tomó un aspecto menos suavizado, con un pico en julio pronunciado a partir del cual empezó el descenso continuado hasta los 19.8°C de octubre.



**Fig. 2 Temperaturas (°C) medias mensuales registradas durante cultivo del arroz en los años 2006 hasta 2009.**

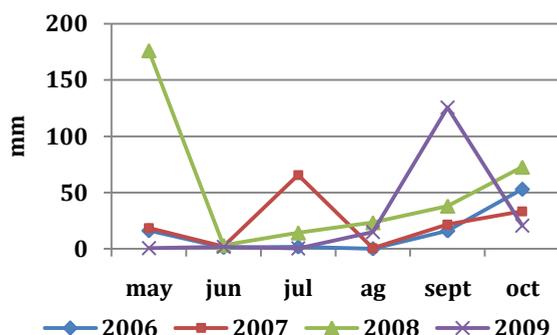
Los grados día acumulados crecieron de forma lineal durante todo el desarrollo foliar a razón de  $15.3 \text{ } ^\circ\text{C} \times \text{dia}^{-1}$  ( $R^2=0.9958$ ,  $p<0.001$ ) tal y como indica la regresión lineal derivada de los cuatro años de datos observados (Fig. 3). Por lo tanto, no se detectaron diferencias en el comportamiento térmico que pudiera explicar diferencias en el ahijado entre los cuatro años de experimentación.



**Fig. 3 Estimación de los grados-día acumulados durante el desarrollo foliar de las plantas.**

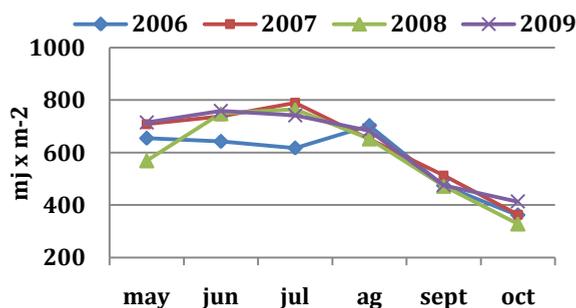
En general, las precipitaciones fueron bajas en los cuatro años pero con mayor variabilidad de valores, que fueron de los 87,7 mm acumulados en 2006 hasta

los 326,8 de 2008. En la figura 3 se observan sólo tres picos de lluvia: en julio de 2007 (65,5 mm), mayo de 2008 (176,1 mm) y en septiembre de 2009 (125,5 mm). La campaña más lluviosa fue la de 2008, con un total de 326,8 mm registrados, seguida por 2009 (163,1 mm), 2007 (141,3 mm) y 2006 (87,7 mm). El año más lluvioso coincidió en ser el más frío.



**Fig. 4 Precipitaciones medias mensuales (mm) durante el cultivo en los años 2006 hasta 2009.**

El comportamiento observado de radiación mensual global acumulada (Tabla 5 y Fig. 5) en el cultivo es muy parecido en los tres últimos años desde junio hasta octubre, sin embargo, en 2006 los valores registrados de mayo, junio y julio son sensiblemente inferiores. Lo mismo sucedió en mayo del 2008. La inferioridad en los primeros tres meses en 2006 y 2008 supone una radiación total acumulada durante el cultivo menor (3455.5 y 3537.4 MJ x m<sup>-2</sup> en 2006 y 2008, respectivamente) que en 2007 y 2009 (3766.8 y 3788.3 MJ x m<sup>-2</sup>, respectivamente). A partir agosto, los valores interanuales mensuales fueron muy parecidos, observándose un descenso importante de la radiación recibida a partir de septiembre.



**Fig. 5 Radiación global (mj x m<sup>-2</sup>) mensual media durante el cultivo en los años 2006 hasta 2009**

Debido a que el objeto de estudio de la presente tesis doctoral es la fase del ahijamiento, seguidamente se indican los valores referentes a temperatura y radiación global media y acumulada obtenidos durante este periodo en los cuatro años de estudio (Tabla 6).

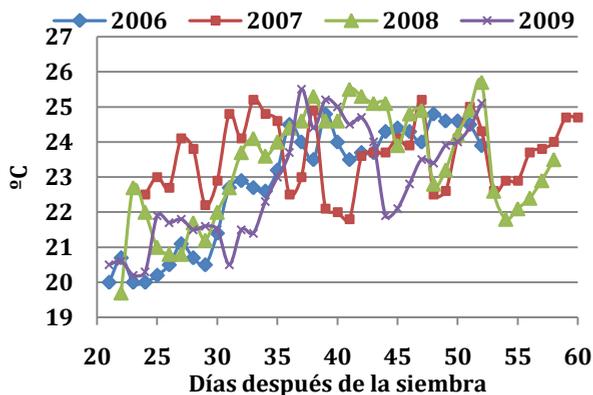
**Tabla 6 Valores medios de la temperatura (°C) y radiación global (MJ x m<sup>-2</sup>) diaria y acumulada durante el estadio de ahijamiento en los años 2006 hasta 2009.**

	Periodo ahijamiento (DDS)	Temperatura	Radiación global	Radiación global acumulada
2006	21-52	22.8	19.6	608.3
2007	27-60	23.6	25.6	869.3
2008	22-60	23.4	25.5	994.3
2009	21-52	23.5	25.5	815.7

Las diferencias entre los valores anuales se reducen respecto las de la campaña y fue destacable la gran uniformidad de valores medios diarios de temperatura y radiación encontrada en los últimos tres años, aunque 2006 registró valores sensiblemente inferiores en ambos parámetros (Tabla 6). Así pues, la temperatura media registrada durante el ahijamiento en los años 2007 hasta

2009 fue de 23.5°C con un rango de variación de 0.2°C, mientras que en 2006 fue de 22.8°C. De igual forma, la radiación global diaria media en los tres últimos años fue de 25,5 MJ x m<sup>-2</sup> (rango de 0.1 MJ x m<sup>-2</sup>) y en 2006 de 19.6 MJ x m<sup>-2</sup>. Las diferencias en radiación acumulada observadas en 2007, 2008 y 2009, responden a la diferencia en la duración del ahijamiento.

La figura 6 muestra la evolución diaria de las temperaturas durante el ahijamiento. Durante los 10-15 primeros días de la fase, las menores temperaturas tuvieron lugar en los años 2006 y 2008 con valores alrededor de los 20 y 21 °C, contrastando con los 23°C encontrados en 2007. Aproximadamente a partir de los 30 DDS y hasta los 40 DDS, todos los años mostraron un ascenso de las temperaturas hasta alcanzar medias cercanas a los 24°C. La conducta general a partir de este momento, fue la estabilización de las temperaturas alrededor de este mismo valor hasta el fin del ahijamiento. Cabe destacar las fuertes oscilaciones térmicas registradas en 2007, mostrando un perfil del gráfico más aserrado que el resto de los años.



**Fig. 6 Evolución de las temperaturas medias diarias durante el periodo del ahijamiento des del año 2006 hasta el 2009.**

Para finalizar, en la tabla 3 se indica la integral térmica desde el momento de la siembra en inicio, fase de máximo ahijamiento (FMA) e inicio de panícula (IP). En el inicio del ahijamiento, las plantas habían acumulado entre 227.3 y 237.5 °C en los años 2006, 2008 y 2009. El año 2007 fue diferente y necesitó acumular alrededor de 100°C más que los otros años debido a una aplicación herbicida que debilitó las plántulas y provocó un enlentecimiento del desarrollo. Esta diferencia se mantuvo a lo largo de esta fase pero se fue suavizando con el tiempo. La suma de grados acumulados durante el ahijamiento no fue superior en 2007 que en los otros años, lo que indica que el efecto negativo del herbicida sobre el desarrollo de la planta sólo tuvo lugar durante la fase de establecimiento de la plántula. Una vez recuperado, el cultivo pudo desarrollarse al mismo ritmo que los otros años.

**Tabla 7 Integral térmica en inicio ahijado, fase máximo ahijamiento (FMA) e inicio de panícula (IP) y grados-día (GD) acumulados durante el ahijamiento.**

	Integral térmica			GD acumulados durante ahijado
	Inicio ahijado	FMA	IP	
2006	237.5	629.4	695.9	485.4
2007	337.0	648.8	853.0	516
2008	228.9	579.4	812.9	584
2009	227.3	460.8	823.8	596.5

### 3.1.2 Temperatura en el agua y suelo del cultivo

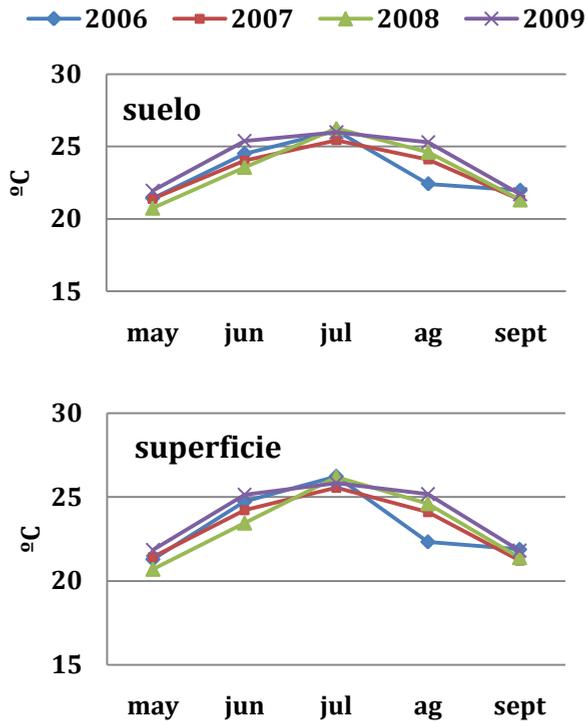
Seguidamente, en la tabla 8 se presentan las temperaturas medias registradas en los campos experimentales. Los datos fueron tomados a nivel del suelo y de superficie a través de sondas cuyas valoraciones se almacenaron en registradores de datos. Las sondas se emplazaron a 7 y 2 cm de profundidad del suelo en 2006, correspondiendo a los valores de suelo y superficie, respectivamente.

A partir de 2007, la temperatura del suelo es la registrada a 3 cm de profundidad y la del agua a nivel de superficie del cultivo (0 cm). Más detalles sobre la instalación de los equipos registradores de temperatura y sobre la toma de datos se describen en la sección de material y métodos (Sección 2.3.1). Las medias generales de los 5 meses de cultivo indican valores entre los 20.1 y 24.4 °C, donde 2007 fue el año con valores más bajos (20.1 y 19.9 °C en suelo y superficie, respectivamente). La evolución de las medias mensuales (Fig.6, Tabla 8) mostró un patrón similar al observado en las temperaturas del aire, pero con los valores más altos en julio con valores entre los 25 y 26°C. La amplitud térmica en el sistema suelo-agua fue menor que la encontrada en las temperaturas aéreas.

**Tabla 8 Temperaturas medias mensuales registradas en el suelo y en la superficie de los campos experimentales de cultivo**

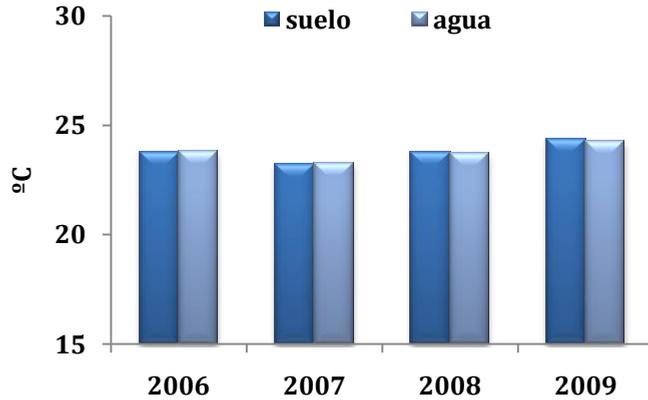
Mes	2006		2007		2008		2009	
	suelo	agua	suelo	agua	suelo	agua	suelo	agua
May	21.4	21.3	21.4	21.4	20.7	20.7	21.9	21.9
jun	24.5	24.7	24.0	24.2	23.6	23.4	25.4	25.2
jul	26.1	26.2	25.4	25.6	26.2	26.2	26.0	25.8
ag	22.4	22.3	24.1	24.1	24.6	24.6	25.3	25.2
sept	22.0	21.9	21.3	21.2	21.3	21.4	21.7	21.8
<b>Media</b>	23.7	23.8	23.2	23.2	23.8	23.7	24.4	24.3
<b>Rango</b>	4.7	4.9	4.1	4.4	5.5	5.5	4.3	4

A partir de 2007, la temperatura del suelo es la registrada a 3 cm de profundidad y la del agua a nivel de superficie del cultivo (0 cm). Más detalles sobre la instalación de los equipos registradores de temperatura y sobre la toma de datos se describen en la sección de material y métodos (Sección 3.1). Las medias generales de los 5 meses de cultivo indican valores entre los 20.1 y 24.4 °C, donde 2007 fue el año con valores más bajos (20.1 y 19.9 °C en suelo y superficie, respectivamente). La evolución de las medias mensuales (Fig.7, Tabla 8) mostró un patrón similar al observado en las temperaturas del aire, pero con los valores más altos en julio con valores entre los 25 y 26°C. La amplitud térmica en el sistema suelo-agua fue menor que la encontrada en las temperaturas aéreas.



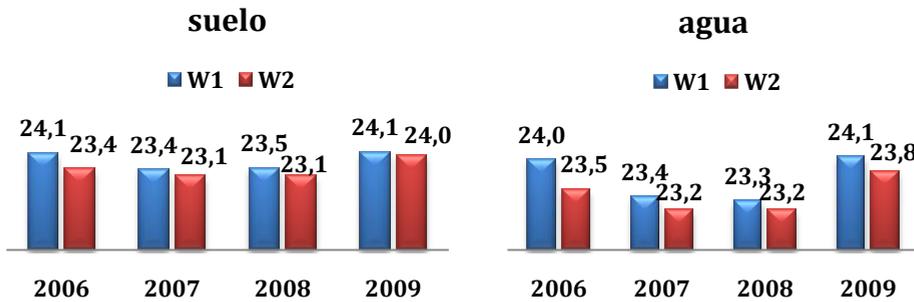
**Fig. 7 Evolución temperaturas medias mensuales registradas en el suelo y en la superficie de los campos de experimentación**

En el gráfico 8 se aprecia como las temperaturas en suelo y superficie son prácticamente idénticas, con una diferencia máxima de 0.2°C observada 2007.



**Fig. 8 Temperaturas medias registradas en el suelo y agua durante los meses de cultivo del arroz en los años 2006 hasta 2009.**

Se compararon las temperaturas del sistema agua-suelo en los dos manejos de agua (Fig.8). Los resultados indicaron poca influencia del sistema de riego en las temperaturas, si bien los valores eran levemente superiores en W1 respecto W2.



**Fig. 9 Temperaturas medias registradas (°C) durante el cultivo en suelo y agua en los dos manejos de agua (W1, W2)**

Las temperaturas registradas durante el ahijamiento oscilaron entre los 25.1° y 25.6°C (Tabla 9). Cuando se comparan las temperaturas en los dos niveles,

observamos que en W1 no siguió ningún patrón concreto mientras que en W2 se detectó una leve superioridad a favor de las temperaturas del suelo. Las diferencias de medias entre los dos manejos se muestran 0.3°C superiores en W1.

**Tabla 9 Temperaturas medias en suelo y superficie de las parcelas durante el ahijamiento en los manejos de agua y diferencias entre ambos tratamientos.**

	Periodo ahijado (DDS)	Lámina continua 7 cm (W1)		Riego intermitente 3 cm (W2)		Diferencia W1-W2	
		Suelo	Agua	Suelo	Agua	Suelo	Agua
2006	21-52	24.9	25.6	24.7	25.0	0.2	0.6
2007	27-60	25.5	25.6	24.9	25.1	0.6	0.5
2008	22-60	25.6	25.4	25.4	25.4	0.3	-0.1
2009	21-52	25.1	25.2	24.8	25.1	0.2	0.0
<b>Global</b>		<b>25.3</b>	<b>25.4</b>	<b>24.9</b>	<b>25.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>

## 3.2 MONITORIZACIÓN DEL AHIJAMIENTO DEL ARROZ

### 3.2.1 Desarrollo foliar

La dinámica del desarrollo foliar es considerada como un instrumento muy útil para la descripción, modelización y comprensión del desarrollo de los cultivos extensivos. El filocrón, que es el intervalo de tiempo entre la aparición de dos hojas consecutivas (Wilhelm y McMaster, 1995b), es el parámetro normalmente utilizado para la descripción del desarrollo foliar. Sus unidades pueden expresarse tanto en tiempo de calendario (días x hoja<sup>-1</sup>) como en tiempo termal (<sup>o</sup>Cd, esto es, <sup>o</sup>C x día<sup>-1</sup> que corresponde a las unidades de GD). Al ser la temperatura el principal factor ambiental determinante de la emergencia de las hojas (Yin y Kropff, 1996), en el presente trabajo se optó por el uso del tiempo termal como unidades del filocrón.

La aparición de las hojas está estrechamente relacionada con diferentes aspectos del desarrollo de la planta como la elongación de los entrenudos, el estadio zurrón y la antesis (Ellis, *et al.*, 1993; Counce, *et al.*, 2000); el desarrollo de las raíces y el inicio de la panícula (Nemoto, *et al.*, 1995; Lee, *et al.*, 2001 ; Tivet, *et al.*, 2001; Jaffuel y Dauzat, 2005 ); y por supuesto, también con el ahijamiento (Kirby, *et al.*, 1985; Miyamoto, *et al.*, 2004). Por todo esto, el conocimiento del filocrón será útil para la caracterización del desarrollo de la planta y para la determinación de los momentos en que hay que aplicar diferentes prácticas de cultivo según el estadio fenológico (Petróczi y Matuz, 2002).

Dada su estrecha relación con el ahijamiento, se incluyó en esta tesis doctoral el estudio del desarrollo foliar de las plantas de arroz con los objetivos de

caracterizar la dinámica de emergencia de las hojas en el tallo principal a través de la modelización, estudiar y evaluar la influencia de los factores considerados para el ahijamiento y determinar su relación con el ahijamiento (apartado 3.2.4) de la presente sección). Para ello, era necesario conocer el número final de hojas en el tallo principal así como la función que mejor describiera la emergencia de las hojas en el tallo principal y que permita su predicción.

### 3.2.1.1 Número final de hojas en el tallo principal

El número total de hojas (NTH) en el tallo principal en Gleva en 2006 y 2009 estuvo comprendido entre los 12.7 y las 14.0 hojas (Tabla 10).

**Tabla 10 Número total de hojas en Gleva en los años 2006 y 2009, rango de valores observado y desviación estándar.**

Año	Número total hojas	Rango	Desviación estándar
2006	14.0	0.50	0.27
2007	13.0	0.68	0.37
2008	13.4	0.17	0.08
2009	12.7	0.30	0.15

Por tanto, la variación en el número total de hojas producido por Gleva fue relativamente baja, coincidiendo con (Yin y Kropff, 1996) que encontraron poca variación en el NTH bajo las mismas condiciones de temperatura y de fluctuación diurna de temperatura.

### 3.2.1.2 Dinámica y tasa del desarrollo foliar. Modelización.

Tal y como se ha expresado en el principio de esta sección, uno de los objetivos de esta parte del estudio era la modelización del desarrollo foliar para disponer de una herramienta que permitiera la predicción de los estadios de la planta dentro de esta fase. Por tanto, se planificó obtener un modelo a partir de los datos observados en 2007 y 2008 y posteriormente ser validado con los del 2009. Sin embargo, en 2007 la aplicación de un herbicida (Propanil 35%) a los 18 y 20 DDS para el control de *Echinocloa sp.* dañó el estado de las plántulas y provocó un retraso de su desarrollo. Esta incidencia interfería en la consecución de nuestros objetivos, por lo que se decidió corregir los valores de los grados día en el momento de la aplicación utilizando los datos de los años posteriores. Según los datos observados en 2006 y 2008, la integral térmica (IT) a las 4.5 hojas fue 186.5 y 189.7°Cd, respectivamente, mientras que en 2007 fue 291.8. Siguiendo los valores observados en 2006 y 2008 se decidió sustituir este valor por 190, y mantener la misma diferencia con el valor original en todos los datos posteriores. Los resultados del análisis posterior de la validación del modelo nos indicaron que la corrección fue, además de pertinente, adecuada.

La función matemática que mejor describía el desarrollo foliar observado en Gleva fue la exponencial (Ec.1):

$$IT = a e^{b \cdot NH} \quad (Ec. 1)$$

Donde,

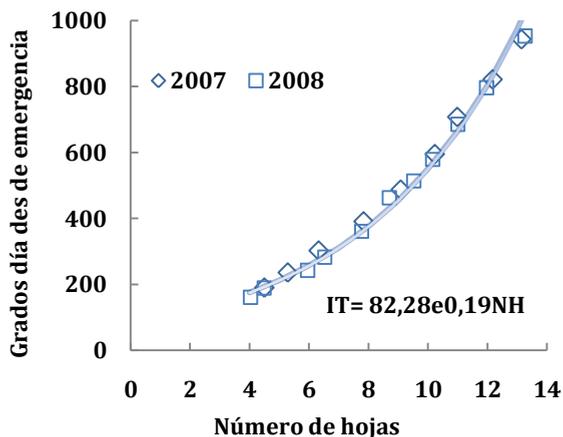
IT: Integral térmica a partir de la emergencia de la plántula

NH: número de hojas (según estadio Haun)

a: intercepción

b: exponente

Se estimaron los parámetros para una ecuación única que pudiera describir la dinámica de aparición de hojas a partir de los datos obtenidos. El resultado de la estimación de los valores fue  $82.28 \pm 1.02$  y  $0.19 \pm 0.003$  para los coeficientes a y b, respectivamente, a un nivel de significación del 0.05 y con un elevado nivel de ajuste ( $R^2=0.9888$ ) (Fig. 10).

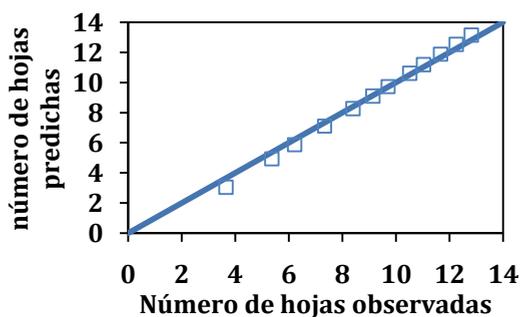


**Fig. 10 Emergencia de las hojas en el tallo principal observada en 2007 y 2008 y modelo derivado de estos datos.**

A partir de la ecuación resultante, se calculó el filocrón mediante la diferencia de grados día entre la aparición de hojas sucesivas. El resultado fue que el filocrón aumenta exponencialmente desde los  $17^{\circ}\text{Cd}$  hasta los  $168^{\circ}\text{Cd}$ . Este aumento progresivo se asocia a la transición del estadio fisiológico juvenil al adulto (Miyamoto, *et al.*, 2004) indicando la influencia de la edad de la planta en esta progresión (Yin y Kropff, 1996). Estos resultados contrastan con los de Nemoto, *et al.* (1995) quienes observaron un cambio brusco en el valor del filocrón en las últimas cuatro o cinco hojas. Diferentes tipos de relaciones entre el desarrollo foliar y el tiempo han sido descritas por diferentes autores en

cereales: relaciones lineares en trigo y cebada (Cao y Moss, 1989), trigo (Slafer, *et al.*, 1994) y arroz (Ellis, *et al.*, 1993); bilineal en arroz (de Raïssac, *et al.*, 2004); potencial en arroz (Yin and Kropff, 1996) y polinómica de cuarto grado también en arroz (Itoh, *et al.*, 2006).

Los datos obtenidos en 2009 se utilizaron para la validación del modelo derivado de los datos de los años 2007 y 2008 para poder evaluar su función de predicción del desarrollo foliar. Para ello, se efectuó el análisis de la regresión entre los valores observados en 2009 y los predichos por el modelo (Fig. 11). El resultado fue una buen ajuste del modelo tal y como indicaron el valor RMSE (0.36 hojas), el valor de la pendiente de la regresión lineal cercano a 1 ( $1.01 \pm 0.01$ ) así como un  $R^2$  de 0.9985.



**Fig. 11 Número de hojas observadas vs número hojas predichas.** La línea continua indica la línea 1:1.

Por tanto, la relación entre la emergencia de las hojas es función del tiempo termal y se puede predecir a través del modelo exponencial:

$$IT = 82.28 x e^{0.19 x NH}$$

La validación del modelo fue correcta aun con la diferencia en la fecha de siembra de 10 días entre los dos primeros años y 2009. El régimen de temperaturas fue muy parecido entre los tres años, lo que explicaría esta falta de influencia de la fecha de siembra en el desarrollo foliar. La temperatura media durante el desarrollo foliar en 2009 fue 23.0°C en 2009 y 23.2°C en 2007 y 2008. Además, el rango de temperaturas durante esta misma fase fue prácticamente idéntica en cada año: 7.9, 7.7 y 7.6 en 2007, 2008 y 2009, respectivamente. Este comportamiento observado también sugiere que Gleva es una variedad sensible a la temperatura e insensible a la duración del día.

Con el objetivo de presentar resultados de más fácil manejo para los agricultores, también evaluamos el ajuste de la emergencia de las hojas a una función lineal (Ec.2) para comprobar si el filocrón se podía asumir constante y así poder aplicar el mismo valor a lo largo del desarrollo foliar. En este caso, el filocrón vendría dado por la pendiente (b) de la ecuación lineal:

$$IT = a + b * NH \quad (Ec.2)$$

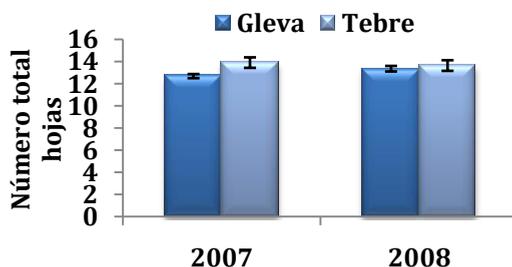
Los resultados mostraron un buen ajuste de los datos observados a una ecuación lineal ( $R^2=0.91$ ) y el valor de la pendiente o filocrón estimado fue  $85.86 \pm 3.47^\circ\text{Cd}$  ( $P < 0.001$ ,  $\alpha = 0.05$ ). El nivel de error de este modelo y si podía ser asumido, necesitaba ser evaluado. Como ejemplo se utilizó el momento del estadio de cuatro hojas y la emergencia de la hoja bandera. Cuando se compararon los resultados obtenidos en ambos modelos, se observó que con el modelo lineal estos estadios necesitaban 176 y 143°Cd más que con el

exponencial. Estos valores traducidos en tiempo de calendario (multiplicando el tiempo termal por la tasa de acumulación de grados día que fue de 15.3 para los dos años) significan 10 días de diferencia. Consideramos que esta diferencia es demasiado grande para ser asumida cuando lo que se pretende es una buena precisión para el uso de las técnicas de cultivo para conseguir un aumento en la eficiencia del cultivo.

### 3.2.1.3 Factores que afectan al desarrollo foliar

#### *Variedades*

Se analizó en número total de hojas producidas por las dos variedades (Fig.12), Gleva y Tebre, y los resultados mostraron que no había diferencias significativas entre ellas, aunque Tebre de forma repetida presentaba más hojas (13.8) que Gleva (13.0). La mayor producción de hojas en Tebre, aunque no significativa, puede ser explicada por la mayor duración del ciclo (140 días) respecto Gleva (120 días).



**Fig. 12** Número total de hojas en el tallo principal en Gleva y Tebre en los años 2007 y 2008.

En cuanto al filocrón y la dinámica de aparición de las hojas, no hubo respuesta del genotipo y en ambas variedades, el desarrollo foliar se podía describir por la misma ecuación con valores de ajuste superiores 0.98.

### *Densidad de planta*

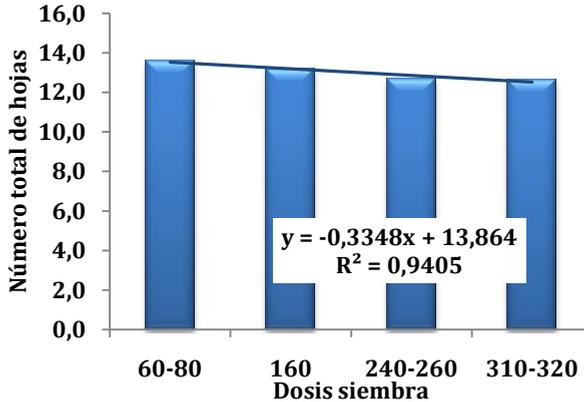
El número total de hojas (NTH) producidas por el tallo principal disminuyó con el aumento de la densidad de planta (DPL) (Tabla 11). En 2007, el NTH en los tratamientos con densidades medias de 53 y 129 plantas x m<sup>-2</sup> fue significativamente superior que en las parcelas con mayor densidad. En 2008, las diferencias significativas tuvieron lugar a partir de las 344 plantas x m<sup>-2</sup>. Por tanto, la densidad de planta afectó el NTH sobre el tallo principal como respuesta competitiva (de Raïssac et al., 2004) establecida a mitad del estadio vegetativo.

**Tabla 11 Número total de hojas en diferentes dosis de siembra en los años 2007 y 2008.**

Año	Dosis siembra (Kg semilla x ha <sup>-1</sup> )	DPL (plantas x m <sup>-2</sup> )	NTH	Error estándar
2007	60	53	13.8a	0.2115
	160	129	13.3ab	
	210	166	13.1bc	
	310	249	12.5c	
2008	80	157	13.8a	0.1375
	160	241	13.5a	
	240	344	13.0b	
	320	480	13.0b	
2009	80	133	13.1a	0.0938
	160	222	12.8ab	
	240	394	12.4bc	
	320	463	12.4c	

Letras diferentes en la misma columna y año significa medias significativamente diferentes (LSD,  $\alpha=0.05$ ).

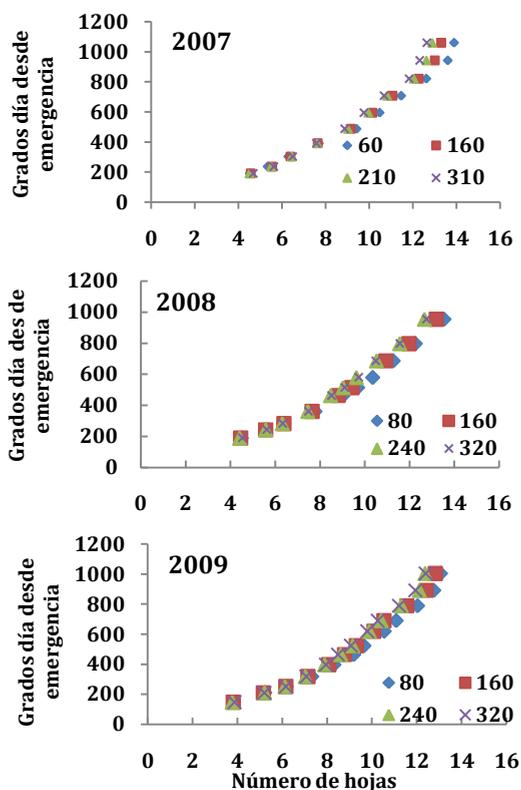
Los resultados mostraron la linealidad de la respuesta del NTH a la dosis de siembra (Fig. 13).



**Fig. 13 Relación entre la dosis de siembra (kg semilla x ha<sup>-1</sup>) y el número final de hojas en el tallo principal.**

La densidad de planta también mostró efectos significativos sobre la tasa de emergencia de las hojas provocando un aumento del filocrón con la densidad (Fig. 14). Con el aumento de número de plantas, el coeficiente a de la ecuación exponencial (a) disminuye mientras que b aumenta o se mantiene, de manera que aumenta el número de grados necesarios para la emergencia de una nueva hoja (Tabla 3), esto es, aumenta el valor del filocrón. La mayor respuesta a la densidad la mostró el parámetro a, mientras que b se mantuvo muy estable e incluso constante en 2009. En 2007, los valores del filocrón estimados a través de las ecuaciones exponenciales estuvieron comprendidos entre los 18 y 137°Cd en la menor densidad de planta y entre los 18 y 222°Cd en la mayor. En 2008, el rango fue de 17 a 154°Cd y de 18 a 193°Cd para 157 y 480 plantas x m<sup>-2</sup>, respectivamente. Finalmente, en 2009 el rango fue de 16 a 181°Cd y de 16 a 244°Cd para 157 y 480 plantas x m<sup>-2</sup>, respectivamente. Por tanto, las diferencias en el filocrón entre densidades de planta se agudizaron en las

últimas hojas donde la magnitud de la respuesta a situaciones de competencia por los recursos (luz, nutrientes y agua) fue mayor.



**Fig. 14 Emergencia de las hojas en el tallo principal en diferentes densidades de planta en los años 2007 hasta 2009. En la leyenda, los números indican las dosis de siembra en kg semilla x ha<sup>-1</sup>.**

Se analizó también el momento en que empezaban las relaciones de competencia entre las plantas y se hizo localizando el momento en que las plantas presentaban por primera vez diferentes estadios foliares entre las diferentes densidades de planta (Tabla 13). En 2007, las relaciones de competencia se detectaron por primera vez después de la emergencia de la octava hoja, a los 589°Cd después de la emergencia de las plántulas o 46 DDS.

En este punto, el número de hojas en el tratamiento de 60 kg semilla x ha<sup>-2</sup> fue significativamente superior que en las dosis de 210 y 310. En 2008, este momento tuvo lugar antes, en el estadio de 7 hojas (360°Cd o 36 DDS) cuando el número de hojas en 80 kg semilla x ha<sup>-2</sup> fue 0.3 puntos superior que en 240 y 320. Finalmente, en 2009 a los 42 DDS (464°Cd) las plantas en las parcelas de 80 kg semilla x ha<sup>-1</sup> tenían 9.2 hojas mientras que en el resto la media era de 8.6 hojas. Es destacable la comparación del tiempo de respuesta entre 2008 y 2009, donde en densidades de planta similares, la respuesta en 2009 tarda 100°Cd más a producirse respecto el año anterior, indicando el mejor estado del cultivo en 2009.

**Tabla 12 Valores estimados de los parámetros de la ecuación exponencial y coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) para las diferentes dosis de siembra o densidades de planta (DPL) en los años 2007 hasta 2009.**

Año	Dosis siembra (Kg semilla x ha <sup>-1</sup> )	DPL (plantas x m <sup>-2</sup> )	a	b	R <sup>2</sup>
2007	60	53	95.9	0.17	0.9921
	160	129	86.7	0.19	0.9932
	210	166	92.4	0.20	0.9951
	310	249	76.4	0.21	0.9942
2008	80	157	83.2	0.18	0.9936
	160	241	79.8	0.19	0.9931
	240	344	75.7	0.20	0.9930
	320	480	79.2	0.20	0.9938
2009	80	133	72.1	0.20	0.9970
	160	222	70.0	0.20	0.9940
	240	394	67.1	0.20	0.9953
	320	463	65.0	0.20	0.9941

La reducción de la tasa de emergencia de las hojas (o aumento del filocrón), como respuesta a la limitación de la disponibilidad de recursos, ha sido anteriormente descrita (Birch, *et al.*, 1998; Wilhelm y McMaster, 1995a). Sin embargo, sólo se detectaron suaves diferencias, 0.3 unidades, en el coeficiente  $b$  de los tratamientos para cada año, aun con amplios rangos de densidades de planta utilizados (196 y 322 plantas  $\times$   $m^{-2}$  en 2007 y 2008, respectivamente). Esto significa que para desarrollar la hoja bandera, las plantas en cultivadas en elevadas densidades sólo necesitan acumular 30°C más, equivalente a dos días, que en densidades bajas. Esta baja capacidad de respuesta del filocrón a la densidad de planta está probablemente relacionada con el número total de hojas y el inicio tardío de la competencia entre las plantas. Las diferencias en el número de hojas se detectaron cuando las plantas ya habían producido la mitad de las hojas totales, por lo que la acumulación de diferencias entre los tratamientos está limitada por el escaso número de hojas que quedan por emerger. Por tanto, considerando la baja variabilidad en la emergencia de las hojas entre densidades de planta tan diferentes, se podría concluir que bajo los rangos de dosis de siembra utilizados por los agricultores no habría influencia en la predicción de la emergencia de hojas y del estadio fenológico del cultivo.

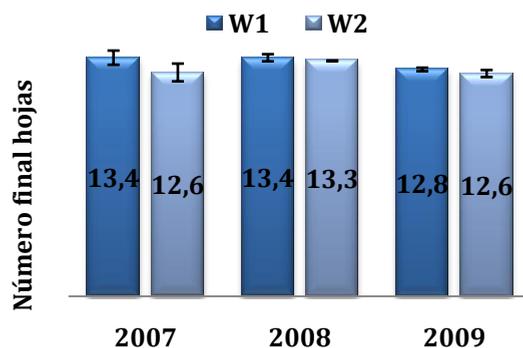
**Tabla 13 Inicio de las relaciones de competencia entre las plantas en las diferentes dosis de siembra en 2007 y 2008.**

Año	Dosis siembra (kg semilla x ha <sup>-1</sup> )	DPL	DDS/IT	Número de hojas	Error estándar
2007	60	53		9,4a	0,088
	160	129	46 DDS/	9,2ab	
	210	166	589 °Cd	9,0bc	
	310	250		8,9bc	
2008	80	157		7,8a	0,0639
	160	241	36 DDS/	7,7ab	
	240	344	360 °Cd	7,5b	
	320	480		7,5b	
2009	80	133		9.2a	0.0896
	160	222	42 DDS/	8.8ab	
	240	394	464 °Cd	6.8b	
	320	463		8.5b	

[DPL: densidad de planta (plantas x m<sup>-2</sup>); DDS: días después de la siembra; IT: Integral térmica (°Cd)]. Letras diferentes en la misma columna y año significa medias significativamente diferentes (LSD,  $\alpha=0.05$ ).

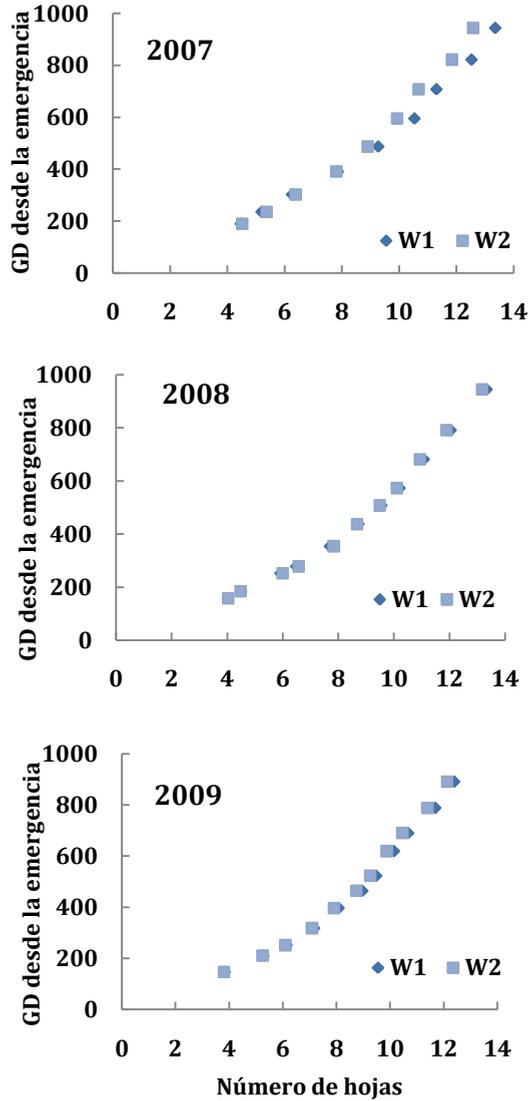
### *Manejo de agua y fertilización nitrogenada*

Se analizó la posible influencia del manejo de agua en el número total de hojas (Fig. 15). Los resultados mostraron que todos los años las plantas en lámina continua de 7 cm (W1) presentaban un mayor número total de hojas que las plantas en riego intermitente a 3 cm (W2), con diferencias significativas en 2007. Aunque la diferencia entre los valores de las medias es baja (0.8, 0.1 y 0.2 hojas en 2007, 2008 y 2009, respectivamente), tuvo lugar consistentemente en 8 de las 9 repeticiones de los tres años de experimentos.



**Fig. 15 Número final de hojas en el tallo principal en los dos manejos de agua, lámina continua a 7cm (W1) y riego intermitente a 3 cm (W2) en los años 2007 hasta 2009.**

En la dinámica del desarrollo foliar también se observaron ligeras diferencias entre tratamientos de agua (Fig.16), mostrando tasas de emergencia de las hojas ligeramente más altas en W1 que en W2, aunque en 2008 de forma prácticamente inapreciable. En la tabla 14 se exponen los términos de las ecuaciones exponenciales que describieron la dinámica del desarrollo foliar. Se observa como los valores del coeficiente  $a$  disminuyeron en W2, mientras que  $b$  aumentó, resultando en un aumento de los grados-día (GD) y consecuentemente, del filocrón.



**Fig. 16 Desarrollo foliar en el tallo principal en los dos manejos de agua en los años 2007 hasta 2009.**

La mayor tasa de emergencia de las hojas permitió la mayor producción de número total de hojas de W1. Todo ello viene explicado por las diferentes

temperaturas registradas en el suelo y/o superficie del cultivo (Fig. 17). Por consiguiente, un aumento de las temperaturas en W1 habría inducido la mayor tasa de emergencia de las hojas del tallo principal y el mayor número total de hojas. Estos resultados coinciden con Fukuda y Iwanami (2006) quienes concluyeron que la influencia del sistema de riego en el NTH tiene lugar a través de la temperatura y no del propio sistema. En su estudio, determinaron la influencia de sistemas de riego (aguas corrientes y estancadas) y la profundidad de la lámina de agua en el crecimiento y desarrollo del arroz. También concuerda con los resultados en trigo de Miglietta (1991) donde, comparando condiciones de suelo seco o suelo con agua sólo de lluvia con un suelo bien irrigado, no encontraron diferencias en el número total de hojas. Se pone de esta manera de manifiesto el control de la temperatura cerca del meristema apical sobre la emergencia de las hojas (Ritchie y NeSmith, 1993).

**Tabla 14 Parámetros de las ecuaciones exponenciales para el desarrollo foliar e integral térmica (IT) de la emergencia de la última hoja en ambos manejos de agua en los años 2007 hasta 2009.**

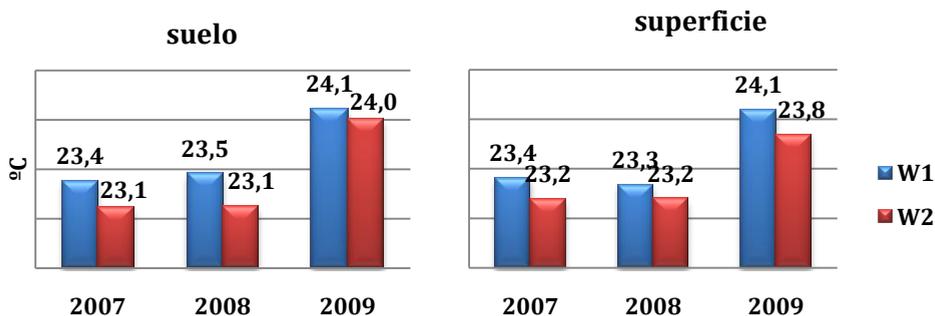
Año	Tratamiento	Parámetros de la ecuación exponencial			IT hasta última hoja
		A	b	R2	
2007	W1	95.3	0.17	0.9932	868.7
	W2	82.6	0.20	0.9956	1112.1
2008	W1	78.6	0.19	0.9950	929.2
	W2	75.9	0.20	0.9958	1021.9
2009	W1	68.8	0.21	0.9961	1054.9
	W2	67.2	0.22	0.9954	1173.4

Cuando se comparó el número total de hojas en las diferentes combinaciones de tratamientos de manejo de agua y fertilización nitrogenada, también se obtuvo respuesta significativa (Tabla 15). Las plantas en lámina continua y fertilización nitrogenada a mitad del ahijamiento (W1N2) produjeron más hojas (13.6) que en riego intermitente y fertilización tardía (W2N2). Este comportamiento tuvo lugar los tres años, sugiriendo que las condiciones de W2N2 se provocaba un retraso del crecimiento de la planta.

**Tabla 15 Número total de hojas (NTH) en los diferentes manejos de agua y combinación de manejo de agua x fertilización nitrogenada.**

Factor	Tratamiento	NTH	Error estándar
Manejo de agua	W1	13.2 a	0.090
	W2	12.8a	
Manejo de agua x fertilización nitrogenada	W1N1	12.9ab	0.2280
	W1N2	13.3a	
	W2N1	12.9ab	
	W2N2	12.5cb	

Las medias corresponden a los tres años de experimentación. Letras diferentes en la misma columna y tratamiento significa diferencias significativas (LSD,  $\alpha=0.05$ ).



**Fig. 17** Temperaturas medias durante el cultivo en la superficie de las parcelas y en el suelo (3 cm profundidad) en los años 2007 hasta 2009.

### 3.2.2 Arquitectura de la planta de arroz

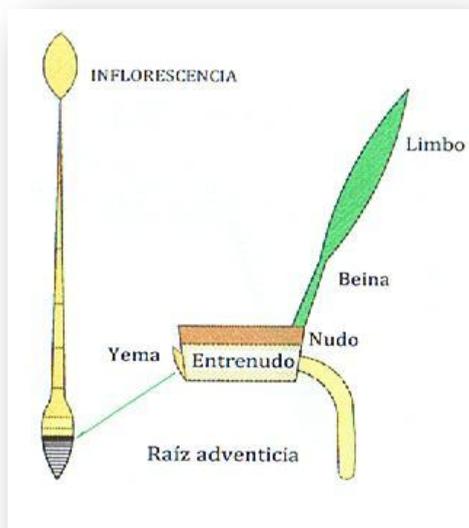
La arquitectura de la planta del arroz es un carácter agronómico que ejerce influencia en el rendimiento y que está modulada por diferentes factores como la altura de las plantas, la capacidad de ahijamiento, el ángulo de los tallos y la morfología de las panículas.

#### 3.2.2.1 Sistema de ramificación de las plantas de arroz

La arquitectura de las gramíneas, grupo al que pertenece el arroz, resulta de la formación expansión y senescencia de la unidad básica, el fitómero o metámero (McMaster, 2005).

Los fitómeros consisten en un nudo asociado a una hoja, el entrenudo que lo sustenta y una yema a la base del entrenudo (Fig. 18). El nudo produce raíces adventicias si no tiene lugar su elongación del entrenudo. En las plantas superiores, el sistema de ramificación está principalmente formado por la morfogénesis reiterativa del meristema apical de los tallos (Nemoto, *et al.*,

1995). El meristema apical se establece durante la embriogénesis y consiste en un grupo de células indiferenciadas que iniciarán la formación de las hojas a partir de las células laterales y la elongación a partir de las células de la base.



**Fig. 18 Esquema del tallo y del fitómero**

El ahijado es el proceso a través del cual las yemas axilares, situadas en la axila de cada hoja, se desarrollan y forman nuevos tallos. Los meristemas axilares tienen el mismo potencial de desarrollo que el meristema apical y cada uno de ellos puede formar un tallo. Los tallos que se desarrollan desde el tallo principal se llaman tallos primarios. Los tallos primarios, de forma similar al tallo principal, producen un tallo secundario en la axila de cada hoja. Los tallos terciarios se producen de los secundarios y así sucesivamente. La generación de tallos suele tener lugar en los nudos sin elongación.

### *Modelo de ahijamiento del arroz: sistema de Katayama*

En el año 1951, se editó un monográfico escrito por T. Katayama (*Studies on tillering of rice, wheat and barley*. Yokendo, Tokyo. En japonés) donde compiló los resultados de sus experimentos sobre el desarrollo de los tallos y su relación con el desarrollo foliar y de las raíces. Según Nemoto (1995) estos estudios forman la base de estudios agronómicos modernos sobre las relaciones entre el desarrollo de los diferentes órganos de las plantas, fenología y la dinámica del ahijamiento y del crecimiento de las raíces. Katayama estableció las reglas básicas que gobiernan el desarrollo de las plantas y de las que se destacan:

- i. La primera hoja de un tallo emerge tres filocrones después de la emergencia del tallo que lo sustenta.
- ii. El despliegue de las hojas sucesivas en el tallo está estrechamente relacionado con el de las hojas del tallo principal (TP).

A partir de estas reglas postuló un sistema generalizado de ahijamiento para el arroz al que frecuentemente se le ha denominado como “Modelo de ahijamiento de Katayama”. A continuación se presenta una tabla genealógica donde se expresa el crecimiento vegetativo de la planta del arroz a lo largo de la aparición de sus fitómeros representados aquí por el número de hojas (Tabla 16).

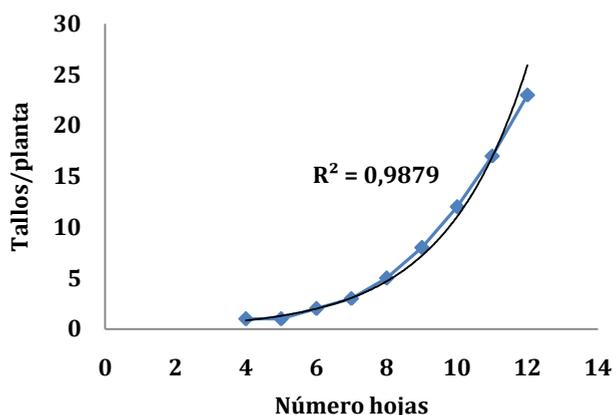
**Tabla 16 Tabla genealógica del crecimiento de la planta del arroz**

NH	TP	Tprim	Tsec	Tterc	Tallos tipo superiores	Tallos emergidos / filocrón	Tallos acumulados
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	2
5	0	1	0	0	0	1	3
6	0	1	1	0	0	2	5
7	0	1	2	0	0	3	8
8	0	1	3	1	0	5	13
9	0	1	4	3	0	8	21
10	0	0	5	6	1	12	33
11	0	0	6	10	4	20	53
12	0	0	5	15	11	31	84
	1	6	26	35	16		84

(NH: número de hojas; TP: tallo principal; Tprim: tallo primario; Tsec: tallo secundario; Tterc: tallo terciario).

Esta tabla fue adaptada por Henry de Laulanié en su documento no publicado *Technical presentation of rice intensification, based on Katayama's tillering model* (Enero, 1992) de la que fue originalmente construida por autor Didier Moreau en su libro *L'analyse de l'élaboration du rendement du riz: les outils du diagnostic* pero al que no se ha conseguido tener acceso. Se trata de una tabla incompleta formada a partir de la regla de sincronización de Katayama entre el desarrollo de las yemas y la emergencia de las hojas: las yemas axilares que se diferencian del tallo principal cada 3 filocrones y cada dos cuando están en los tallos. Para facilitar la comprensión de la tabla, los tallos cuaternarios y quaternarios se agregan en la misma columna. El número de tallos emergidos en

cada filocrón sigue la serie de Fibonacci. A partir las normas de sincronización, se deduce en primer lugar que la emergencia del primer tallo primario (T1) tiene lugar en el estadio de 4 hojas y que la del primer tallo secundario no ocurre hasta sexto estadio foliar. La figura 19 muestra el incremento exponencial teórico del número de tallos en la planta representado en la tabla genealógica.



**Fig. 19 Crecimiento exponencial del número de tallos en una planta de arroz según el modelo de ahijamiento de Katayama.**

Sin embargo, en condiciones de campo el crecimiento de los tallos está fuertemente regulado por la latencia de las yemas y la mortalidad de los tallos. Por otro lado, en esta tabla se considera la producción de tallos hasta la emergencia de la hoja 12, pero las plantas generalmente no completan este periodo y el ahijamiento termina antes del final del desarrollo foliar. Por lo tanto, este modelo cuantifica el número potencial de tallos que la planta puede producir que superaría los 100 y que contrasta con los 10 tallos que se contaron en 2007 y que es el mayor promedio registrado en este estudio.

### 3.2.2.2 Diferenciación y crecimiento de las yemas axilares

La flexibilidad de la actividad de los meristemas permite una gran variación en cuanto a la arquitectura de la planta, permitiendo de esta manera una buena adaptación de la planta a diferentes condiciones ambientales.

El ahijamiento o ramificación de los tallos está regulada por dos pasos diferentes:

- 1) Diferenciación de los meristemas axilares en yemas
- 2) Crecimiento de las yemas axilares.

La diferenciación de los meristemas axilares en yemas está regulada por mecanismos endógenos de la planta y no intervienen factores ambientales (Matsuo y Hoshikawa, 1993).

#### 3.2.2.2.a Factores que afectan el crecimiento de las yemas axilares

La actividad de las yemas axilares está controlada por múltiples señales moleculares o endógenas (sistema hormonal, expresión génica), de desarrollo (edad de la planta y posición del fitómero) y ambientales (temperatura, densidad de planta, disponibilidad de nutrientes, calidad de la luz,...) (Ishikawa, *et al.*, 2005).

##### a.1 Mecanismos endógenos de regulación del crecimiento de las yemas

El mecanismo central que regula esta actividad es la dominancia apical y consiste en la supresión del crecimiento de la yema axilar por el crecimiento del meristema apical (Thiman y Skoog 1933, citado en Ishikawa, *et al.*, 2005). La dominancia apical está regulada por una red de señales hormonales,

principalmente las auxinas y las citoquininas. Las citoquininas se sintetizan en las raíces y se transportan a las yemas axilares donde interrumpen la latencia de las yemas. Por otro lado, las auxinas modulan la concentración de citoquininas, por tanto, también intervienen en la regulación del crecimiento de las yemas (Nordstrom *et al.*, 2004, citado en Wang y Li, 2005).

Además de estas señales hormonales existen otros mecanismos moleculares regulados por expresiones génicas que controlan el ahijamiento en las plantas de arroz. De hecho, el ahijamiento es un proceso muy complejo donde la expresión de muchos genes debe estar involucrada (Li, *et al.*, 2003). Lin *et al.* (2003) identificaron el primer gen funcional que controla el ahijamiento del arroz, el gen MOC 1, que presenta diferentes funciones como promover el crecimiento de las yemas axilares y un efecto negativo sobre la estatura de las plantas. Otros genes que intervienen en el ahijamiento son OsTB1, que actúa sobre el crecimiento de las yemas (Takeda *et al.*, 2003); el gen D88, cuyas plantas mutantes presentan una elevada producción de tallos cortos y panículas pequeñas (Gao, *et al.*, 2009); genes del ahijamiento enano (*tillering dwarf gens*) cuya función está relacionada en la actividad de las yemas por supresión de su actividad (Ishikawa, *et al.*, 2005); y los mutantes *fine culm 1 (fc1)* cuyo fenotipo consiste en un ahijamiento intenso con tallos finos.

### *a.2 Factores ambientales de regulación del crecimiento de las yemas*

Existen diversos factores ambientales que inciden sobre la emergencia de los tallos o crecimiento de las yemas, algunos de los cuales son objeto de estudio en la presente tesis doctoral.

La temperatura se ha descrito en diversas ocasiones como factor influyente en el desarrollo de la planta y en concreto en la tasa de emergencia de los tallos, tanto en arroz (Bos y Neuteboom, 1998) como en otros cereales como trigo (Cao y Moss, 1989; Gao, *et al.*, 2009).

El grado de influencia de los factores es función del momento del estadio vegetativo, de manera que durante los primeros estadios del crecimiento vegetativo la disponibilidad de nutrientes (Van Loo *et al.*, 1992; citado en Bos y Neuteboom, 1998) y carbohidratos (Davies 1965; citado en Bos y Neuteboom, 1998) y la lámina de agua (Sasaki *et al.*, 2002; citado en Sasaki y Toriyama, 2006) son los que mayor influencia ejercen sobre el desarrollo de las yemas. A medida que avanza el desarrollo, empiezan a establecerse fenómenos de competencia intraespecífica incidiendo en la emergencia de los tallos y cese del ahijamiento. A partir de este momento, la densidad de planta representa el factor central que determinará la limitación de la disponibilidad de recursos como el agua (Yoshida, *et al.*, 1982), nitrógeno (Ishizuko y Tanada, 1963 citado en Sasaki y Toriyama, 2006; Yoshida, 1981) y luz (Yoshida, *et al.*, 1982; Lauer y Simmons, 1989; Zhong, *et al.*, 2002; Evers, *et al.*, 2006) y su interacción entre ellos (Wilhelm, *et al.*, 1993).

Otros factores que juegan un papel importante en la emergencia de tallos son el sistema de cultivo, con una mayor producción de tallos en trasplante que en siembra directa (Yoshida, 1981; Counce, *et al.*, 1996); y el tipo de variedad, donde las variedades de tipo indica suelen presentar una mayor capacidad de ahijamiento que las japonica (Dingkuhn, *et al.*, 2000).

### *a.3 El vigor precoz del cultivo*

Se define como la emergencia de los tallos y la formación de la cubierta foliar avanzada o precoz debido a condiciones favorables al cultivo (Pasuquin, *et al.*, 2008).

Diversos autores relacionan la consecución de este establecimiento avanzado del cultivo con mayores rendimientos (Yoshida, *et al.*, 1982; Pasuquin, *et al.*, 2008; Gendua, *et al.*, 2009).

Esta es una de las premisas de las que parte esta tesis doctoral y a partir de la cual se definió el estudio de diferentes factores que influyen en el ahijamiento y cuáles de ellos pueden favorecer el vigor precoz del cultivo.

#### **3.2.2.3 Estructura jerárquica de las plantas de arroz**

A continuación, se exponen los resultados obtenidos referentes a la estructura de la planta del arroz según su categoría y posición topológica. Se siguió la misma nomenclatura que Counce (1996) quien distinguió entre tipo o categoría y posición o orden. El tipo de tallo hace referencia al tallo del que procede, esto es, los tallos primarios proceden del tallo principal, los tallos secundarios de los primarios y así sucesivamente. El orden de los tallos hace referencia a la secuencia de su aparición dentro de la misma categoría y, al mismo tiempo, a la posición topológica del nudo del que emergen; por ejemplo, el tallo 1 procede de la axila de la hoja número 1.

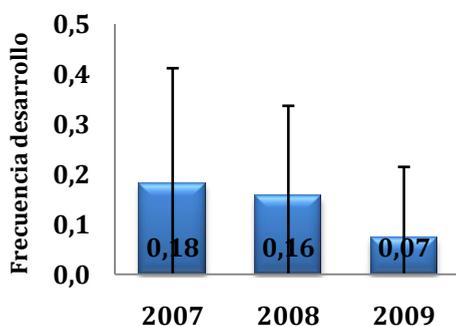
Los análisis realizados durante este estudio se centraron en los tallos primarios. No se observaron tallos terciarios. Por eso, la nomenclatura utilizada en este trabajo sólo considera la posición y no la categoría, de manera que el

tallo primario uno se expresa como T1. En el momento en que los tallos llegan a ser productivos y son portadores de panículas, la nomenclatura T se substituye por P y, por consiguiente, P1 significa panícula en el tallo uno.

### 3.2.2.3.a Categoría o tipo de tallos

Se exponen los resultados sobre la emergencia de tallos secundarios durante el ahijamiento. Los valores se obtuvieron indirectamente a partir de las plantas de seguimiento (en el marco de monitorización de las plantas) mediante la diferencia entre el número total de tallos y los tallos primarios producidos por la planta durante el ciclo. Por tanto, los valores que a continuación se detallan son los porcentajes de tallos secundarios generados por las plantas, sin especificar su orden.

En este apartado no se muestran los resultados correspondientes al año 2006 porque se dudó de su fiabilidad debido a las imprecisiones derivadas de esta valoración.



**Fig. 20 Tasa de emergencia de tallos secundarios en la planta.**

La media del porcentaje de emergencia de tallos secundarios no superó el 20%, pero se registraron elevados niveles de heterogeneidad dentro y entre años, especialmente los dos primeros (Fig.20). Los años 2007 y 2008 mostraron porcentajes similares (18 y 16%, respectivamente) pero 2007 obtuvo la mayor dispersión de datos con valores comprendidos entre el 2 y el 40%, indicando una distribución irregular de las plantas en las parcelas. En 2009, se registraron los porcentajes más bajos, 7%, y un rango de valores más estrecho. La menor producción de tallos secundarios es debida al acortamiento de la fase del ahijamiento de este año, 38 días respecto los 46 días de promedio de 2007 y 2008. Por otro lado, la mayor homogeneidad señala la mejor distribución de las plantas en las parcelas.

Los resultados de Kim y Vergara (1990) difieren quienes observaron una frecuencia de desarrollo de tallos secundarios del 52%. La diferencia entre resultados se explica a través del sistema de cultivo (trasplante), el periodo de ahijado y la tasa de aparición de tallos. Durante el trasplante del arroz las raíces se rompen, provocando un *shock* en la planta que provoca que el ahijado se desplace en posiciones más avanzadas, aumentando la probabilidad de emergencia de tallos secundarios. En cuanto al periodo del ahijado, en el experimento de Kim y Vergara la mayor duración del ahijado (entre 27 y 36 días comparados con los 17 y 27 días del presente trabajo) y la mayor tasa de aparición de tallos permite también aumentar las probabilidades de desarrollo de los tallos. Zhu, *et al.* (2002) observaron como el porcentaje de tallos secundarios y terciarios aumentaba en un 5% a partir del desarrollo de la novena hoja en las dos variedades híbridas utilizadas en su experimento, aunque la aparición de tallos secundarios empezó en el séptimo estadio foliar. Las variedades utilizadas en este experimento desarrollaron 15 hojas en total

en el tallo principal. En las condiciones del presente trabajo, a partir de la octava y novena hoja el ahijado cesó e incluso empezó a bajar el número de tallos en la planta puesto que el número final de hojas en las variedades Gleva y Tebre es 13. A partir de estas observaciones, se pone de manifiesto que el número final de hojas es un carácter que influenciará la producción total de tallos y su estructura jerárquica en la planta (Samonte, *et al.*, 2006).

En ningún caso se produjeron tallos terciarios, contrastando otra vez con los resultados de Kim y Vergara (1990) con porcentajes entre el 3 y 7%. Se trata de un resultado lógico si se tiene en cuenta que a partir del octavo estadio foliar el ahijamiento empezó a cesar. La tabla genealógica del ahijado (Tabla 13) muestra que, en este estadio foliar, el número de tallos terciarios esperables es 1 y además proveniente de las posiciones más bajas que, como se verá posteriormente en este trabajo, sus yemas axilares son las que menor probabilidad tienen de crecer.

### ***3.2.2.3.b Factores que influyen en la estructura del ahijado según categoría***

#### ***b1. Manejo de agua y fertilización nitrogenada***

En la tabla 17 se exponen las medias de tallos secundarios producidos en diferentes condiciones de manejo de agua y fertilización nitrogenada. Se detectaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de agua y nitrógeno en 2008, concretamente entre los tratamientos W2N1 (21%) y W2N2 (13%), indicando que la influencia del nitrógeno sólo tuvo lugar en riego intermitente (W2). Este año, las plantas en riego intermitente y fertilización precoz mostraron una mayor capacidad de ahijamiento que las plantas en riego intermitente y fertilización tardía.

**Tabla 17 Frecuencia de desarrollo de tallos secundarios en las diferentes combinaciones de manejo de agua y fertilización nitrogenada.**

	2007	2008	2009
W1N1	0.22±0.18	0.13±0.19	0.08±0.18
W1N2	0.22±0.26	0.16±0.16	0.09±0.23
W2N1	0.16±0.23	0.21±0.18	0.06±0.12
W2N2	0.12±0.22	0.13±0.18	0.06±0.12

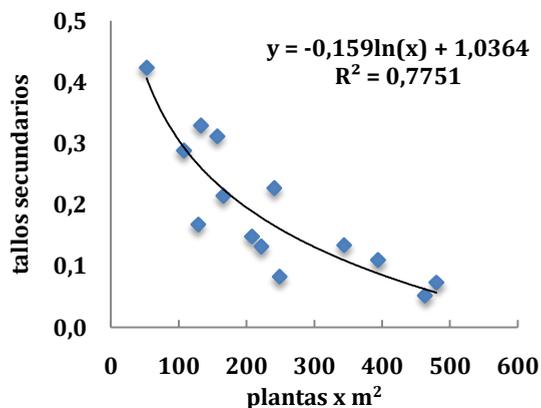
Las mayores frecuencias observadas en 2007 en lámina continua de 7 cm están relacionadas con la duración del ahijamiento, que es de 54 días mientras que en riego intermitente de 3 cm es de 48 días (ver sección 3.2.3.3.c)

Por consiguiente, se podría concluir que el desarrollo de los tallos secundarios sigue el comportamiento del ahijamiento global de la planta y ni el manejo de agua ni la fertilización nitrogenada ejercerían ningún efecto directo sobre esta categoría de tallos. Por tanto, la mayor producción de tallos secundarios respondió a una mayor capacidad de ahijamiento, bien por emisión de tallos, bien por duración del estadio.

### *b.2 Densidad*

El porcentaje de tallos secundarios en la planta disminuyó con la densidad de planta siguiendo una función logarítmica (Fig. 21) debido al acortamiento de la duración del ahijamiento y a la consecuente menor producción de tallos primarios. La figura 21 muestra cómo a partir de las 200 plantas x m<sup>-2</sup> la proporción permaneció alrededor del 1% e incluso disminuyó a partir de las 400 plantas x m<sup>-2</sup>, cuando el cultivo consiste prácticamente en una población de tallos primarios. Los porcentajes más altos se encontraron, como era de

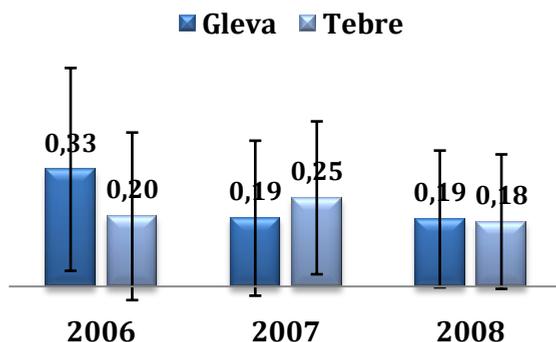
esperar, en las densidades más bajas (menos de 150 plantas x m<sup>2</sup>), donde el alargamiento del ahijado permite más tiempo para la producción de tallos.



**Fig. 21 Relación entre densidad de planta y porcentaje de tallos secundarios**

### *b.3 Variedades*

No se encontraron diferencias significativas en cuanto a la emergencia de tallos secundarios entre las dos variedades (Fig.22).



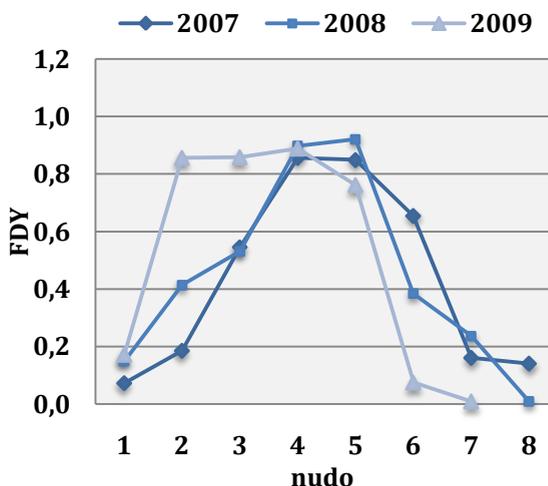
**Fig. 22 Tasa de emergencia de los tallos secundarios en las variedades experimentadas en los tres primeros años de experimentación.**

### 3.2.2.3.c Orden o posición de los tallo primarios

Los valores detallados en el siguiente apartado hacen referencia a la fracción de yemas que se desarrollan en el tallo principal en cada nudo. Se calculó a partir del número total de tallos observados en cada posición dividido por el número total de plantas, que representa el número total de yemas por nudo. Por tanto, se está calculando la frecuencia de desarrollo de las yemas según su posición. Bos y Neuteboom, 1998 denominan este concepto como *specific site usage* cuya traducción adaptada sería uso específico de las posiciones, mientras que Jaffuel y Dauzat (2005) utilizaron el término frecuencia de ramificación (*Branching frequency*). Con el objetivo de encontrar un término simple y significativo, se propone y se utiliza en esta tesis el término frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY) o probabilidad de emergencia del tallo.

**Tabla 18 Frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY) según orden (2007-2009).**

Orden	2007	2008	2009
1	0.07	0.15	0.17
2	0.19	0.41	0.86
3	0.55	0.53	0.86
4	0.86	0.90	0.89
5	0.85	0.92	0.76
6	0.65	0.38	0.08
7	0.16	0.24	0.01
8	0.14	0.01	



Las frecuencias de desarrollo encontradas (FDY) oscilaron entre 0,01 hasta el 0,92. Los años 2007 y 2008 se comportaron de forma muy similar, siendo las posiciones 4 y 5 las que mayores porcentajes presentaron con valores comprendidos entre el 86 y 92 % (Tabla 18). Coincide este comportamiento por el observado por Yan, *et al.* (2009) donde las plantas cuyas yemas de nudos 1 hasta 3 abortaron, desarrollaron las yemas de posiciones centrales y altas, debido a la interrupción de la latencia de las yemas en estas posiciones. En cambio, en 2009 las mayores frecuencias se concentraron en más posiciones y más bajas, de manera que las emergencias de los tallos 2 hasta el 5 fueron superiores al 75%. Este comportamiento observado en el 2009 coincide en

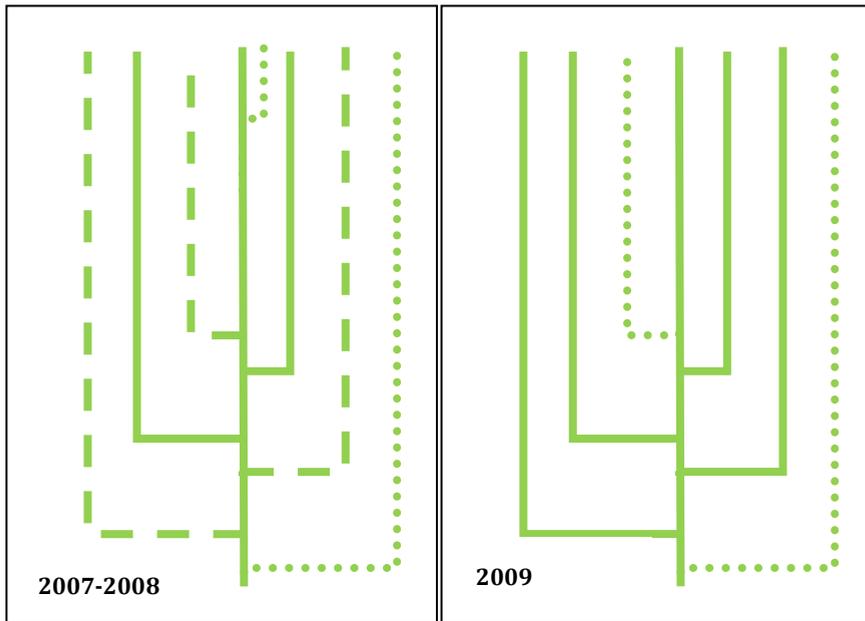
gran medida por el descrito por Jaffuel y Dauzat (2005), donde las mayores frecuencias (superiores al 80%) fueron localizadas entre las posiciones T2 y T6. A partir de T6, observaron como la probabilidad de emergencia disminuyó hasta un 10% y fue nula en la novena. La semejanza de estos resultados obtenidos en invernadero y tiestos con los aportados en el presente estudio en 2009 señala la buena calidad de las plántulas obtenida y, a su vez, la influencia de este buen estado en el comportamiento de la planta en cuanto a la frecuencia de emergencia de los tallos y a las relaciones de dominancia entre las diferentes posiciones. La situación observada en 2009 correspondería al estado de vigor precoz de cultivo que se mencionó en secciones anteriores y se describía por un establecimiento precoz del cultivo y de la cubierta foliar. En un estudio sobre la influencia de densidad de planta sobre la jerarquía del desarrollo de los tallos de sorgo (Lafarge, *et al.*, 2002) se concluyó que la disponibilidad de asimilados determina la emergencia de tallos y en el caso de los nudos inferiores, esta disponibilidad está relacionada con el área foliar de sus hojas madres, que es pequeña y con un bajo nivel de desarrollo. En este sentido, Lauer y Simmons (1985) observaron en cebada que los tallos en sus primeras etapas de crecimiento dependían de los asimilados importados principalmente de la hoja que los sustenta así como de la inmediatamente superior a ella. Los resultados del presente estudio apuntan en la misma dirección, y sugieren que en 2009 se obtuvieron las condiciones de cultivo óptimas para un mejor desarrollo foliar de los fitómeros inferiores respecto los años previos, permitiendo un mayor éxito en la emergencia de sus respectivos tallos.

Los tres años coinciden en los bajos valores de desarrollo de T1, coincidiendo con Bos y Neuteboom (1998) en trigo y Jaffuel y Dauzat (2005) en arroz. Por

tanto, el crecimiento de las yemas de la primera hoja del tallo principal normalmente queda suprimido (Ishikawa, *et al.*, 2005).

En cuanto a las posiciones tardías, los tres años mostraron que los tallos T6 y superiores sufrieron un fuerte descenso de las FDY aunque de forma más marcada en 2009 (8%) que en los años previos (65 y 38% en 2007 y 2008, respectivamente). En posiciones superiores, las yemas no crecen debido a la latencia provocada por la dominancia apical (Takahashi, 1992). Además, el desarrollo de las yemas está también relacionado con la disponibilidad de nutrientes pero esta vez debido a las relaciones de competencia que se establecen con los tallos más precoces. Esta competencia se ve acentuada por su menor área foliar a causa del menor número de hojas (Lafarge, *et al.*, 2002) y por el estadio de elongación del tallo principal, momento en el que los asimilados de las hojas del tallo principal se exportan hacia los entrenudos, en detrimento de los tallos (Lauer y Simmons, 1985).

A partir del octavo nudo en 2009 y del noveno en 2007 y 2008, las yemas permanecieron latentes (Ishikawa, *et al.*, 2005).



**Fig. 23 Esquema de la estructura del ahijado primario de las plantas en los años 2007-2008 y en 2009.** La línea continua significa porcentajes de emergencia superiores al 80%, la discontinua entre el 20 y 70% y la punteada menores del 20%.

Finalmente y, a modo de resumen, se representan unos esquemas que representan la estructura de las plantas según el ahijamiento primario así como las probabilidades de desarrollo de las posiciones (Fig.23).

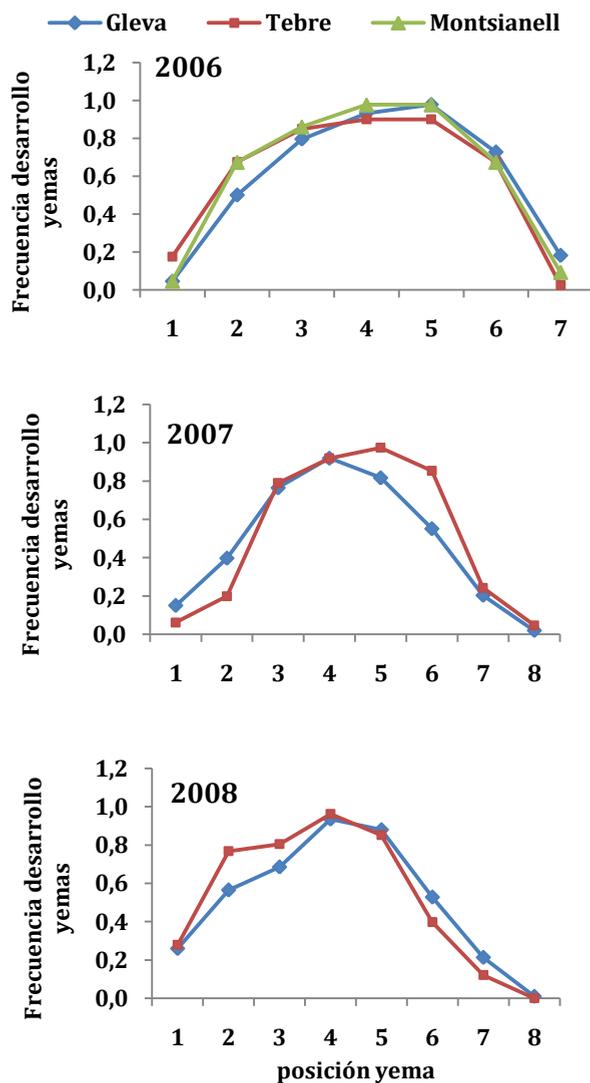
El esquema está diseñado a partir del orden de los tallos y sus respectivas frecuencias de desarrollo. Los tallos representados son de T1 hasta T7 en los años 2007-2008 y de T1 hasta T6 en 2009. El eje central es el tallo principal. El desarrollo de los tallos tienen lugar de forma acropétala, siendo T1 el situado a la base del esquema.

### *c.1 Factores que influyen en la estructura del ahijado primario*

Existen diversos factores agronómicos que inciden en la frecuencia de desarrollo de las yemas y en la distribución de estos valores a lo largo del tallo principal. Las estudiadas en la presente tesis doctoral fueron el manejo de agua, la fertilización nitrogenada (Experimento 2) y la densidad de planta (Experimento 1). En el experimento 2 también se incluyó el factor densidad (ver Material y Métodos), pero como la interacción con los otros dos factores no fue significativa, se decidió no integrarlo en el análisis del manejo de agua y fertilización nitrogenada. Los datos presentados a partir de este experimento corresponden a la media de las dos dosis de siembra utilizadas (160 y 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>).

#### *c.1.1. Variedad*

Los resultados de los análisis estadísticos indicaron que no hubo interacción significativa entre la densidad de planta y la variedad, por lo que se exponen los resultados del comportamiento de las variedades Gleva y Tebre sin considerar las densidades de planta.



**Fig. 23 Frecuencia de desarrollo de las yemas en los nudos del tallo principal en las variedades Gleva, Tebre y Montsianell (sólo 2006) en los años 2006 hasta 2008.**

La figura 24 muestra el comportamiento observado en Gleva y Tebre durante los años 2006 hasta 2008 y Montsianell en 2006, la cual se dejó de utilizar dado

que no mostraba diferencias respecto las otras variedades. No se observa respuesta varietal al desarrollo de las yemas según su orden, e incluso se observó como Tebre mostró un ahijado tardío en 2007 respecto Gleva mientras que en 2008 fue precoz. Las dos variedades son de tipo *japónica* y la diferencia en la duración de ciclo de 20 días no influyó en el comportamiento del ahijamiento.

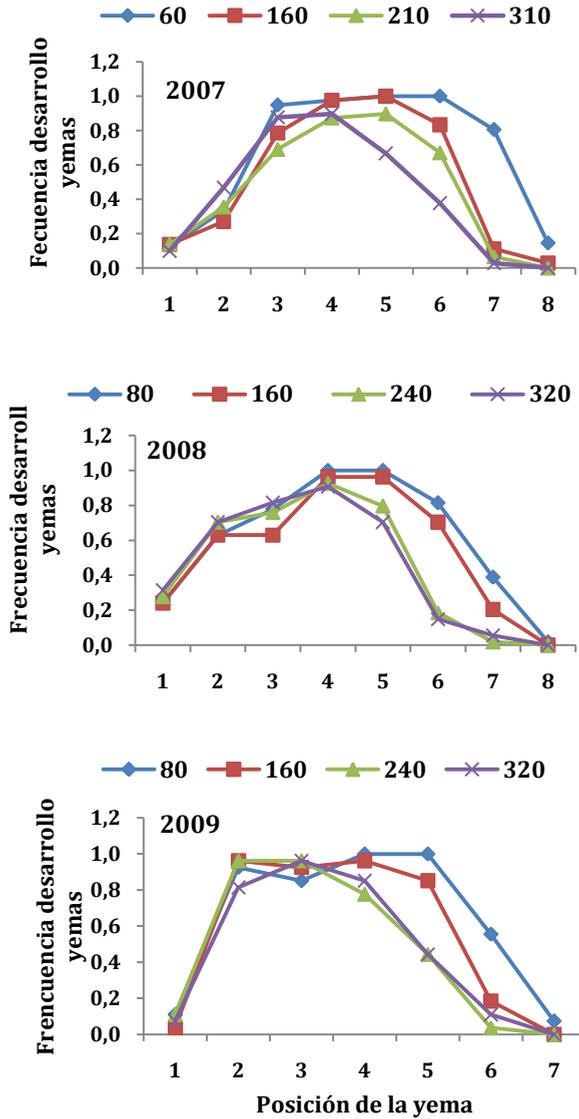
### *c.1.2 Densidad de planta*

La influencia de la densidad de planta en el crecimiento de las yemas se mostró de forma clara y consistente en los tres años (Fig.25). Las diferencias en la frecuencia de desarrollo de las yemas no se manifestaron hasta T5 en 2007 y T4 en 2008 y 2009. Por tanto, hasta T4 las plántulas crecieron sin restricciones de recursos, ni nutricionales ni de radiación ni de agua. A partir de este momento y en las dosis de siembra más altas, el crecimiento de los tallos se vio afectado de forma proporcional a la dosis de siembra. En 2008 y 2009, los tratamientos de 240 y 320 kg semilla x ha<sup>-1</sup> respondieron de la misma forma con un fuerte descenso en T6 en 2008 y T5 en 2009. En las dosis de 80 y 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, los porcentajes se mantuvieron superiores al 80% en T5 y también en T6 en 2008. La respuesta más tardía encontrada en 2007 fue debida a la menor densidad de planta derivada del menor porcentaje de establecimiento de plántula.

El cese del ahijamiento en posiciones posteriores es debida a la falta de disponibilidad de asimilados (Lafarge, *et al.*, 2002) y por la influencia del LAI (índice de área foliar). Según Zhong, *et al.* (2002) el LAI afecta al ahijamiento por la atenuación de intensidad de luz y/o influencia de la calidad de la luz en la base de la cubierta foliar donde están situadas las yemas jóvenes. Por tanto, la

luz y la disponibilidad de nutrientes son los factores limitantes del ahijamiento avanzado.

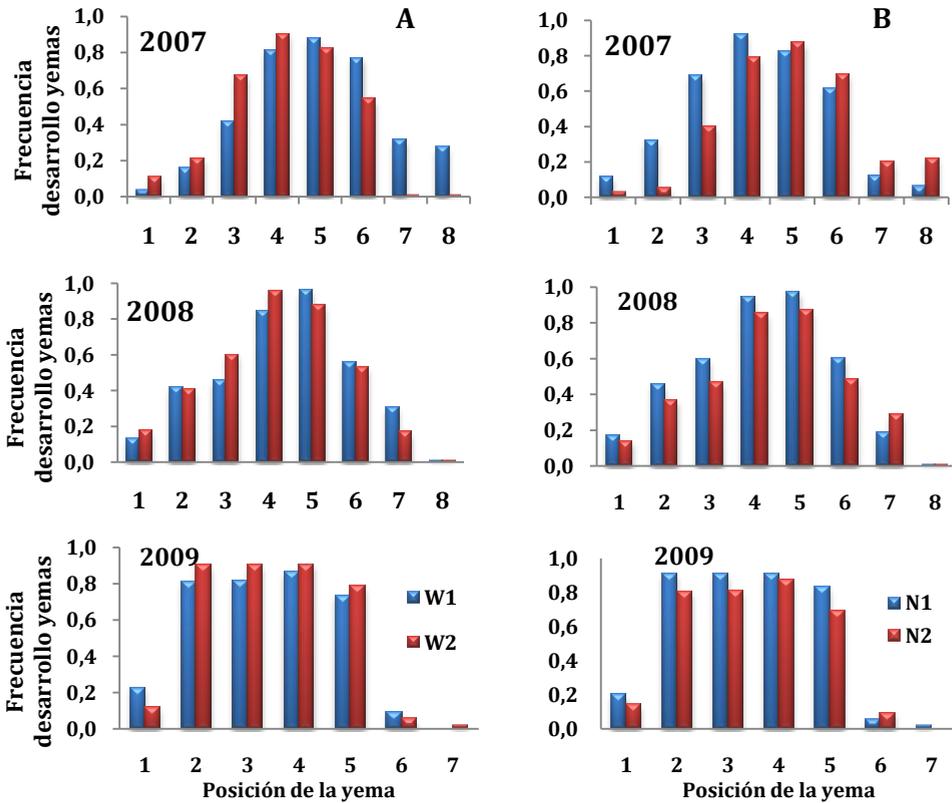
Además, se pudieron observar diferencias en la posición del último tallo desarrollado que se relacionó negativamente con la dosis de siembra (Sasaki y Toriyama, 2006). El tallo T7 sólo se observó en porcentajes superiores al 20% en la menor dosis de siembra.



**Fig. 24 Tasa emergencia según su orden de tallo en diferentes de dosis de siembra.**

c.1.3 Manejo de agua y fertilización nitrogenada

Los factores manejo de agua y fertilización ocasionaron respuestas significativas en las frecuencias de desarrollo de las yemas (Fig. 25).



**Fig. 25** Influencia de los factores manejo de agua (A) y fertilización nitrogenada (B) en la tasa de emergencia de los tallos según su posición en los años 2007-2009.

Las principales diferencias entre tratamientos se mostraron en 2007, lo que señala la importancia de una adecuada práctica agrícola en condiciones desfavorables del cultivo, en nuestro caso por la aplicación de herbicida.

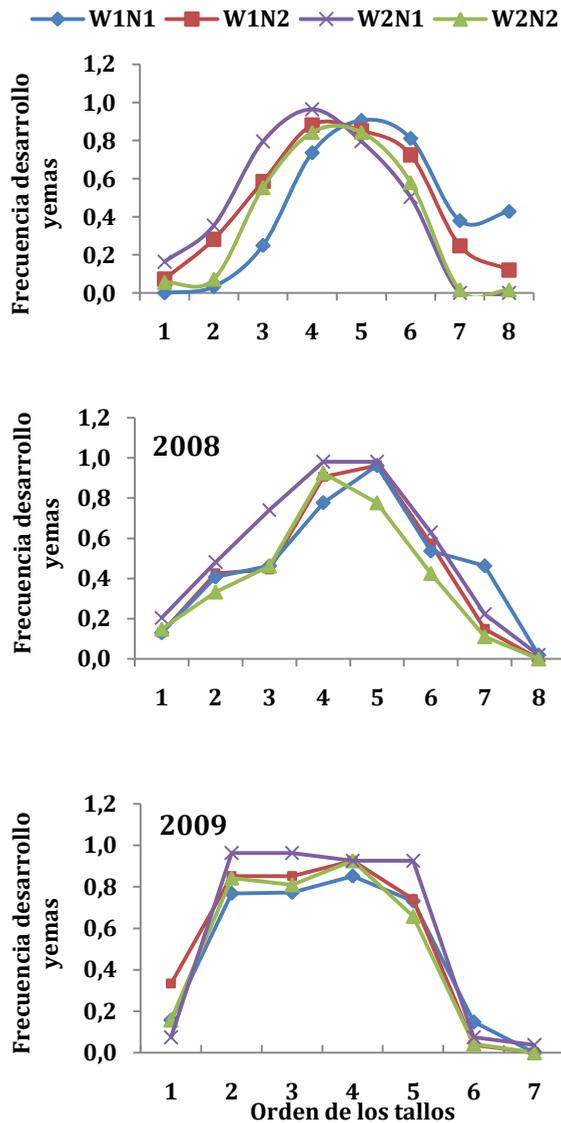
En general, los resultados mostraron que el riego intermitente a 3 cm (W2) promovió el ahijamiento precoz repetidamente en los tres años en las posiciones T3 y T4 con diferencias de hasta 25 puntos. En 2009, las diferencias se observaron más pronto, en T2 y T3, con una diferencia de 10 puntos para ambas posiciones. En 2007 y 2008, el menor desarrollo de tallos en las primeras posiciones en W1 se compensó en las tardías, con frecuencias de desarrollo de las yemas sensiblemente superiores que en W2. En 2009 no se detectó esta respuesta porque el crecimiento de las yemas a partir de la sexta posición fue prácticamente nulo y la superioridad de W2 se mantuvo entre T2 y T5. Estos resultados concuerdan con los observados por Sasaki *et al.* (2002) (citado en Sasaki y Toriyama, 2006) quien concluyó que la profundidad de la lámina de agua influenciaba en el porcentaje de tallos emergidos en las posiciones inferiores a través de la inhibición de su crecimiento provocada por la dominancia apical (Jiang *et al.*, 1994).

Respuestas muy parecidas y de la misma magnitud se observan cuando se considera la fertilización nitrogenada, dentro y entre años, con un estímulo del ahijado precoz cuando el abonado se realiza al inicio del ahijado (N1). Pham Quang *et al.* (2004a) también atribuyó la menor emergencia de los tallos en posiciones más bajas a la falta de nitrógeno. Esta misma respuesta fue encontrada en su grado más extremo por Sekiya (1963) (citado en Matsuo y Hoshikawa, 1993) donde el crecimiento de los tallos fue inhibido en plantas cultivadas en agua y sin aportación de nitrógeno hasta el noveno estadio foliar. Sasaki y Toriyama (2006) relacionaron el porcentaje de N foliar con la emergencia de los primeros tallos: si no se alcanzaba un valor crítico el tallo no se desarrollaba. Ishizuka and Tanaka (1963) (citado en Sasaki y Toriyama, 2006) concluyeron que la emergencia vigorosa de los tallos requiere de un

contenido de nitrógeno foliar del 3,5% o superior en las hojas activas y el ahijado cesaba cuando era inferior al 2,5%. Por su parte, Matsuo y Hoshikawa (1993) observaron que la concentración de nitrógeno en la parte del tallo del tallo principal era baja durante el ahijado y que aumentaba durante la fase del encañado (elongación del tallo), concluyendo que la aparición de los tallos dependía de la concentración de N en la parte del tallo del tallo principal.

Las diferencias más pronunciadas en 2007 y el desplazamiento topográfico de la respuesta en 2009 sugieren que existe otro factor relacionado, probablemente la disponibilidad de recursos tal y como proponía Lafarge y Hammer (2002).

A continuación, se muestra la distribución de la frecuencia de desarrollo de yemas en los diferentes órdenes del tallo principal en los diferentes tratamientos de manejo de agua y fertilización nitrogenada (Fig.26).



**Fig. 26 Tasa de emergencia de los tallos según su orden en las diferentes combinaciones de los factores agua y nitrógeno.**

La combinación entre riego intermitente y fertilización precoz (W2N1) se mostró como la más favorecedora para el ahijamiento precoz mientras que la

menos favorecedora fueron las condiciones de lámina continua y fertilización tardía (W1N2). Las diferencias entre estos dos tratamientos en las posiciones más diferenciadas se muestran en la tabla 4. La posición T3 mantuvo diferencias de 20 puntos entre los dos tratamientos los tres años. En los otros nudos las respuestas fueron variables, destacándose los 20 puntos de T4 en 2008 y T2 en 2009.

**Tabla 19 Frecuencia de desarrollo de las yemas (%) en las posiciones más bajas en los tratamientos W1N2 y W2N1.**

	Posición yema	W1N2	W2N1	Diferencia
2007	T2	28	35	7
	T3	59	80	21
	T4	88	96	7
2008	T2	41	48	7
	T3	46	74	28
	T4	78	98	20
2009	T2	77	96	19
	T3	77	96	19
	T4	85	93	8

En cambio, tratamientos riego intermitente y fertilización tardía (W2N2) y lámina continua y fertilización precoz (W1N1) no mostraron diferencias entre sí debido a desacoplamiento de los efectos producidos por cada uno de ellos. En W2N2, el riego intermitente favorece el desarrollo de las yemas más bajas, pero la falta de nitrógeno impide su desarrollo; en W1N1 el nitrógeno se pierde porque el manejo de agua impide el crecimiento de las yemas.

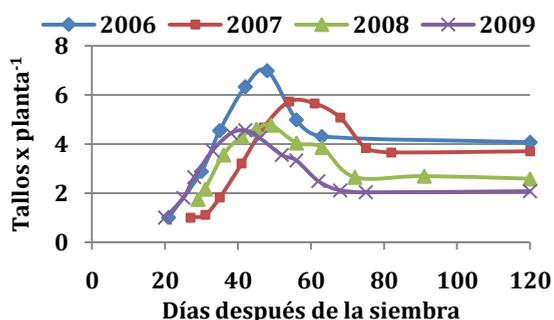
Para finalizar y a modo de resumen, se confirmó que el manejo de agua intermitente a 3 cm de agua así como la aplicación de la fertilización

nitrogenada al inicio del ahijamiento promueven el ahijamiento precoz de las plántulas.

### 3.2.3 Dinámica del ahijamiento en planta

Como preámbulo de esta sección, es importante recordar que, tal y como se explica en el apartado *Análisis de datos* del capítulo 2 (Material y métodos), los datos obtenidos en 2006 mostraron pautas sensiblemente diferentes que en años posteriores por posibles imprecisiones en las valoraciones. Por ello, no se consideraron estos datos como resultados propiamente sino que como datos preliminares, aunque sí son debidamente descritos en la presente sección.

Los valores registrados mediante la monitorización del número de tallos en las plantas de seguimiento permitieron representar la evolución del número de tallos o dinámica del ahijamiento en la planta desde el inicio de la fase hasta el momento de la cosecha (Fig.27).



**Fig. 27 Evolución del número de tallos en planta en los años 2006 hasta 2009.**

El ahijamiento empezó entre los 20 y 27 DDS y consistió en un aumento progresivo del número de tallos hasta alcanzar la fase de máximo ahijado

(FMA), con valores entre los 4 y 7 tallos x planta<sup>-1</sup> (Tabla 20). Esta fase tuvo lugar entre los 40 y 55 DDS, dependiendo del año. A partir de este momento, empezaron los procesos de senescencia y consecuentemente, el decrecimiento de número de tallos hasta alcanzar un número estable comprendido entre los 2 y 4 tallos x planta<sup>-1</sup>, correspondientes al número de panículas en el momento de la siega. La fijación del número de tallos tuvo lugar entre los 70 y 75 DDS, coincidiendo con la floración. En 2006, la falta de una valoración intermedia entre el inicio de panícula y el momento de la siega dificulta la determinación del momento en que se definió el número final de tallos aunque se estimó que tuvo lugar alrededor de los 70 DDS. Los datos indicaron que el inicio de panícula (IP), que ocurrió entre los 55 y 60 DDS, se produjo después de la fase del máximo ahijamiento. Este intervalo de tiempo fue denominado por Tanaka *et al.* (1964) (citado en Matsuo, *et al.*, 1995) como “retraso del periodo vegetativo” y sucedía en aquellos casos en que el final del periodo vegetativo (cuando se consigue la FMA) no coincide con el inicio del reproductivo sino que se pospone. Durante este intervalo de tiempo, tiene lugar una reducción del número de tallos y de la absorción de nutrientes así como un aumento del peso (Matsuo, *et al.*, 1995).

**Tabla 20 Estadios del ahijamiento: inicio, máximo y final ahijamiento en los años 2006 hasta 2009.**

Año	Fecha siembra	Densidad de planta	Inicio ahijado	Fase máximo ahijamiento		Panículas		Duración (días)
				DDS	NT	DDS	NP	
2006	16 mayo	189	21	48	6.9±1.5	70	4.1±2.0	49
2007	18 mayo	127	27	54	4.8±2.0	75	2.6±1.4	48
2008	20 mayo	222	22	45	4.6±1.0	72	2.6±1.1	50
2009	8 mayo	250	21	38	4.4±0.5	68	2.1±0.9	40

Acrónimos y unidades: DDS(días después de la siembra); NT (número de tallos por planta); NP: número de panículas. Unidades densidad de planta: plantas x m<sup>-2</sup>)

En la tabla 20 se muestran los datos relacionados con la dinámica de ahijamiento en planta. La densidad de planta es la registrada en el marco de monitorización. En 2006, se estimó la misma densidad de planta que en la subparcela. A partir de 2007, la densidad de los marcos se corrigió mediante trasplante a partir de los promedios obtenidos en las subparcelas.

Con el fin de evaluar la posible influencia de la temperatura en la duración y los estadios del ahijamiento, se calculó la integral térmica desde la siembra hasta los diferentes estadios del ahijamiento (inicio, fase máximo ahijamiento). Los resultados se comportaron de la misma manera que cuando se utilizaron unidades temporales (Tabla 21) indicando que no fue la temperatura quien marcó las pautas del ahijamiento.

**Tabla 21 Tiempo termal y de calendario en el inicio y fase máximo ahijamiento y en inicio de panícula en los años 2006 hasta 2009.**

Año	Inicio ahijamiento		Fase máximo ahijamiento		Inicio Panícula	
	DDS	GD	DDS	GD	DDS	GD
2006	21	249.5	48	646.2	52	634.6
2007	27	353.1	47	666.0	62	903.9
2008	22	240.6	45	595.3	60	829.4
2009	21	239.8	38	477.2	52	699.7

### **3.2.3.1 Estadios del ahijado del arroz**

#### **3.2.3.1.a Inicio ahijamiento**

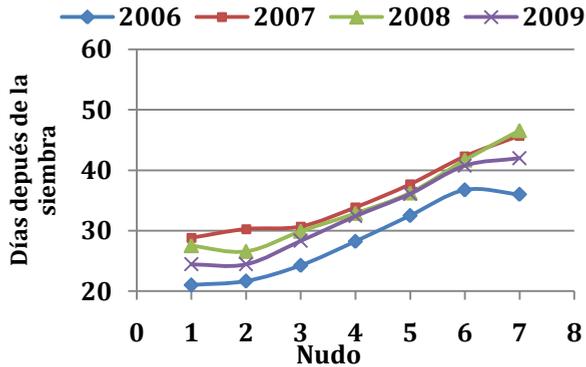
El momento del inicio del ahijamiento se calculó asumiendo que tiene lugar al estadio de 4 hojas (Yoshida, 1981) y a partir de la regresión entre el número de hojas (sección 3.2.1) y los días después de la siembra. Los resultados de la estimación indicaron que el inicio sucedió a los 21 ó 22 DDS en los años 2006, 2008 y 2009. En 2007, se observó un retraso (27 DDS) respecto los otros años que estuvo provocado por una aplicación de herbicida para el control de la población de *Echinochloa* (Propanil, 35%) a los 19 y 21 DDS. La aplicación provocó el daño de las plántulas y un retraso en su desarrollo, además de disminuir el establecimiento de plántula y aumentar su heterogeneidad. Las consecuencias del daño se reflejarán en otros resultados como posteriormente se detalla. Por tanto, en condiciones normales de cultivo el ahijamiento empieza entre los 21 ó 22 DDS aunque puede retrasarse frente condiciones adversas al establecimiento del cultivo.

#### **3.2.3.1.b Emisión de tallos: tasa de aparición y fase máximo ahijado**

El momento del máximo ahijamiento ocurrió entre los 45 y 54 DDS los tres primeros años, mientras que en 2009 se adelantó hasta los 38 DDS. El mismo comportamiento se advirtió en el momento de definición de las panículas, con un ligero avance en el tiempo en 2009 (68 DDS) respecto los otros años cuyos valores oscilaron entre los 70 y 75 DDS. Por tanto, la fecha de siembra pudo haber influido directa o indirectamente en las diferentes fases del ahijamiento así como en su duración, ya que cuando se adelantó la siembra 10 días el periodo de ahijamiento se acortó otros 10 días, tal y como se puede observar en la tabla 1. Normalmente, cuando se hace referencia a la influencia de la fecha de

siembra es a través de la duración del día o del fotoperiodo. En nuestro caso, los 10 días no repercutieron en este parámetro por lo que se descarta la influencia directa del factor fecha de siembra y se alude a otros posibles factores asociados que deberían tenerse en cuenta en futuros estudios. Hay que recordar en este caso la creencia popularizada entre los agricultores sobre la conveniencia de sembrar en fechas tempranas.

El número máximo de tallos (NMT) producidos fue muy parecido en los tres últimos años (4.8, 4.6 y 4.4 en 2007, 2008 y 2009, respectivamente), mientras que en 2006 se alcanzaron los 6.9 por planta. Una mayor capacidad de ahijamiento puede ser debida bien a un periodo más largo, o bien a una mayor tasa de aparición de tallos (días x tallo<sup>-1</sup>). En 2006, esta etapa duró 49 días, un tiempo similar a 2007 y 2009; por otro lado, en 2009 el ahijamiento fue más corto (40 días) mientras que el número de tallos producido mostraba pocas diferencias respecto los dos años previos. En consecuencia, fue necesaria la evaluación del efecto de la tasa de aparición de tallos entre el inicio y la fase de máximo ahijamiento. Su cálculo se realizó a partir de la regresión entre el orden del nudo y el momento de emergencia de cada uno de ellos. El momento de emergencia se obtuvo a partir de los datos tomados sobre el número de hojas en el tallo en el momento de su primera detección y considerando un filocrón en los tallos primarios de 3 días x hoja<sup>-1</sup>. El producto del número de hojas del tallo por el filocrón da como resultado el tiempo desde su emergencia que, restado a la fecha de detección del tallo indica el momento de su aparición.



**Fig. 28 Momento emergencia de los tallos primarios (2006-2009).**

El gráfico 28 representa la aparición sucesiva de los tallos primarios en el tiempo y se observó que las funciones tomaban una forma sigmoidea. No obstante, si las funciones se ajustaran a una lineal, se podría asumir una tasa constante de aparición de los tallos (TET) a lo largo del ahijamiento que vendría dada por la pendiente de las rectas, otorgando simplicidad a la estimación y predicción de la aparición de los tallos. En este caso la función se expresaría como:

$$ME = a \cdot PT + b \tag{Ec.3}$$

Donde,

*ME* = momento de emergencia de los tallos (en días después de la siembra, DDS)

*a* = tasa emergencia de los tallos primarios (TETP)

PT= posición del tallos

*b*=punto de intercepción de la función (incio ahijamiento)

Cuando se ajustaron las funciones a una recta, los coeficientes de determinación indicaron un buen ajuste para todos los años (Tabla 22), sin embargo se observaron diferentes variaciones en esta pauta que había que considerar. Los valores oscilaron entre 3.2 y 3.4 días x tallos primario<sup>-1</sup> en función de la distorsión ocasionada por las posiciones extremas. 2006 mostró una TETP menor que los otros años (3.2 días x tallos primario<sup>-1</sup>), lo que explicaría el mayor número máximo de tallos producido.

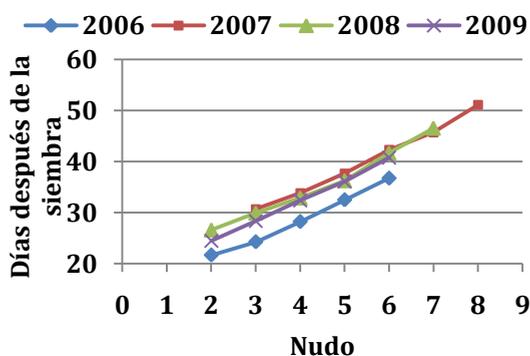
En general, las dos primeras posiciones aparecieron al mismo tiempo en los cuatro años debido al retraso de T1 ocasionado por su débil desarrollo. En 2007, T2 y T3 también emergieron prácticamente de forma simultánea, siendo en este caso T3 quien retardó su aparición como consecuencia de los daños originados por la aplicación herbicida. En las posiciones más avanzadas, en 2006 y 2009 se rompió la linealidad con la aparición del último tallo que tuvo lugar al mismo tiempo que el precedente.

**Tabla 22 Estimación de los momentos de aparición de los tallos primarios a través de una función lineal.**

Año	Ecuación lineal	TETP (todos los nudos)	R <sup>2</sup>	TETP (nudos centrales)	R <sup>2</sup>
2006	ME=3.0*PT+18.50	3.0±0.12	0.9681	3.2±0.09	0.9879
2007	ME =3.2*PT+23.05	3.2±0.17	0.9383	4.0±0.12	0.9843
2008	ME =3.4*PT+20.96	3.4±0.18	0.9417	3.9±0.13	0.9786
2009	ME =3.4*PT+19.10	3.4±0.18	0.9866	4.1±0.15	0.9520

La tasa de emergencia de los tallos viene dada por la pendiente de la función. La estimación de los parámetros de la ecuación lineal (pendiente y intercepción) fue significativa para una probabilidad  $p < 0.001$ .

Eliminando los valores extremos (Fig.29), que también eran los que poseían frecuencias de desarrollo más bajas, obtuvimos funciones lineales con mayor nivel de ajuste así como valores interanuales de la tasa de aparición de los tallos más estables alrededor de 4 tallos x día<sup>-1</sup> (Tabla 22). En 2007, se acotaron los valores entre T3 y T8. Los porcentajes de emergencia de las posiciones anteriores no alcanzaron los 20 puntos, siendo prácticamente nulo en el caso de T1. En los años restantes, con establecimientos de plántula mejores y mayor uniformidad del cultivo, la primera posición que se consideró fue T2, con emergencias superiores al 40 %. Además, en el 2006 y 2009 se obvió T7 por tener frecuencias inferiores al 10%.

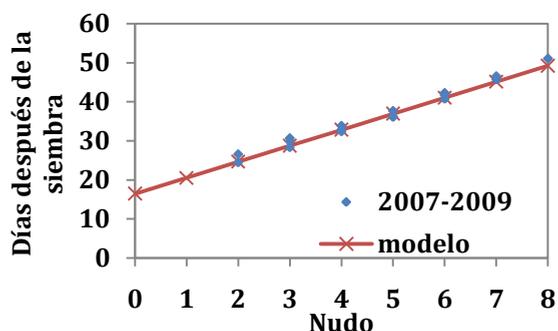


**Fig. 29 Momento de emergencia de los tallos primarios en las posiciones centrales (2006-2009).**

Por tanto, si se obvian las posiciones con porcentajes muy bajos se consiguen valores más estables a lo largo de los años así como mejores ajustes a la regresión lineal, con valores siempre superiores al 0.95 (Tabla 22).

Según estos resultados, una mayor tasa de emergencia en 2006 explicaría el mayor número máximo de tallos. Además, sugieren que en condiciones de un

buen establecimiento del cultivo la estimación de la aparición de los tallos primarios puede realizarse de forma muy precisa a partir de la emergencia de T2 y hasta T6. Para poder aportar una única tasa emergencia de tallos primarios interanual, a partir de los resultados de 2007, 2008 y 2009, se estimaron los términos para una única función lineal (Fig.4). La estimación de los parámetros resultó altamente significativa ( $P < 0.001$ ) y con elevados niveles de ajuste ( $R^2 = 0.97$ ). El valor de la pendiente, esto es, de la TETP, es de  $4.1 \pm 0.23$  días  $\times$  tallo<sup>-1</sup> (Tabla 23) indicando que a partir del segundo nudo, los tallos primarios se producirán de forma sucesiva cada 4.1 días.



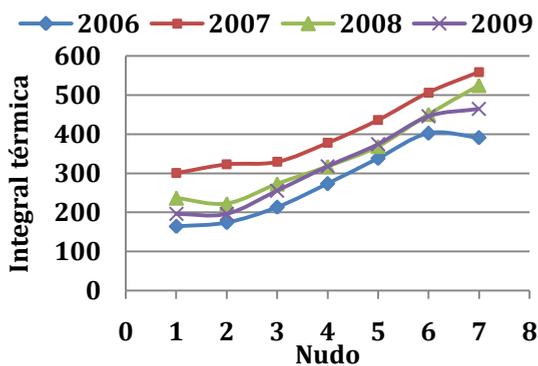
**Fig. 30 Modelización de la aparición de los tallos primarios a partir de los datos observados en los tallos T2 hasta T6 en los años 2007 hasta 2009.**

**Tabla 23 Estimación de los parámetros de la función lineal de la emergencia de los tallos.**

Término	Valor estimado	Error Estándar	Prob> t	R2
Intercepción (a)	16.5	1.10	<,0001*	0.9691
ME	4.1	0.23	<,0001*	

Para la construcción de esta recta se han excluido los valores de 2006

Para evaluar la influencia de la temperatura en la emergencia de los tallos primarios se hizo una regresión entre los tallos primarios y sus momentos de emergencia en tiempo termal o integral térmica (IT) desde la emergencia de las plántulas (Fig. 31). Tal y como era previsible, las funciones seguían el mismo patrón que cuando en las ordenadas del gráfico se consideraban los días después de la siembra, puesto que el incremento diario de grados seguía una función lineal con valores interanuales de la pendiente muy similares, alrededor de los 15 °C diarios (ver sección 3.1). Por tanto, no se pudo evaluar la influencia de la temperatura porque su comportamiento fue el mismo durante el cultivo en los cuatro años de experimentación. Estudios previos sobre la influencia de la temperatura en el ahijado indicaron que la temperatura se relaciona negativamente con la producción de tallos (Matsuo y Hoshikawa, 1993)



**Fig. 31 Aparición de los tallos primarios en tiempo termal.**

### *3.2.3.1.c Senescencia de los tallos y número final de tallos productivos*

A partir de la fase de máximo ahijamiento empieza a producirse un decrecimiento neto de la población de tallos como consecuencia de procesos de

senescencia, que finalmente definirán el número de tallos productivos o panículas por planta. La mortalidad de los tallos es debida a las actividades reproductivas y de traslocación de asimilados, que agotan los nutrientes que se han ido acumulando en los órganos vegetativos (Matsuo, *et al.*, 1995).

El número de panículas por planta, al igual que el NMT, también se mostró sensiblemente superior en 2006 (4.1) respecto los años posteriores (2.6 en 2007 y 2008; 2.1 en 2009). Para la evaluación del balance global neto del ahijamiento, es necesario relacionar el número de panículas con el número máximo de tallos. Se introduce, de esta manera, el concepto eficiencia del ahijamiento, que se desarrolla en la siguiente sección.

### 3.2.3.2 Eficiencia del ahijamiento

La eficiencia del ahijamiento permite cuantificar la relación entre el número de tallos productivos respecto el total producido (Ec.4):

$$\text{Eficiencia ahijamiento (\%)} = \frac{\text{Número panículas}}{\text{Número máximo de tallos}} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

En la tabla 24 se exponen los valores obtenidos en los 4 años de experimentos. Alrededor del 50% de los tallos totales producidos fueron productivos, con valores comprendidos entre el 44% en 2006 y el 57% en 2007.

**Tabla 24 Eficiencia del ahijamiento en planta en los años 2006 hasta 2009.**

Año	Eficiencia ahijamiento (%)
2006	44.02±10.65
2007	56.9±11.1
2008	51.1±10.1
2009	44.8±5.5

Los resultados de los tres últimos años sugieren una relación inversa entre el vigor precoz del cultivo y la eficiencia del ahijamiento en la planta. La eficiencia depende de la magnitud de la competencia entre los tallos por los carbohidratos y en nitrógeno absorbido desde la fase de máximo ahijado hasta el espigado (Nuruzzaman, *et al.*, 2000). El año 2009, que presentó un desarrollo del área foliar más prematuro, registró una eficiencia del 45%, mientras que 2007, con un establecimiento del cultivo más tardío y más heterogéneo, alcanzó el 57% de 2007. El menor porcentaje de tallos productivos en condiciones de buen desarrollo vegetativo se atribuye a una disminución del nitrógeno foliar por fenómenos de dilución de este elemento (Dingkuhn, *et al.*, 1992) y a la mayor mortalidad de los tallos provocada por una mayor área foliar ( Zhong, *et al.*, 2002; Zhong, *et al.*, 2003).

Los porcentajes obtenidos en el presente estudio contrastan con los aportados por Kim y Vergara (1990) que fueron del 67% y el 85% en la variedad con baja y alta capacidad ahijadora, respectivamente. Zhu, *et al.* (2002) también encontraron una alta efectividad en el ahijado, alcanzando valores hasta el

74%. La diferencia de valores entre estos estudios y el aquí expuesto reside en el sistema de cultivo pues en siembra directa las eficiencias disminuyen por la mayor tasa de crecimiento vegetativo que repercute en una mayor superficie foliar que provoca mayores mortalidades por los efectos de sombreo y competencia de recursos que anteriormente se han descrito.

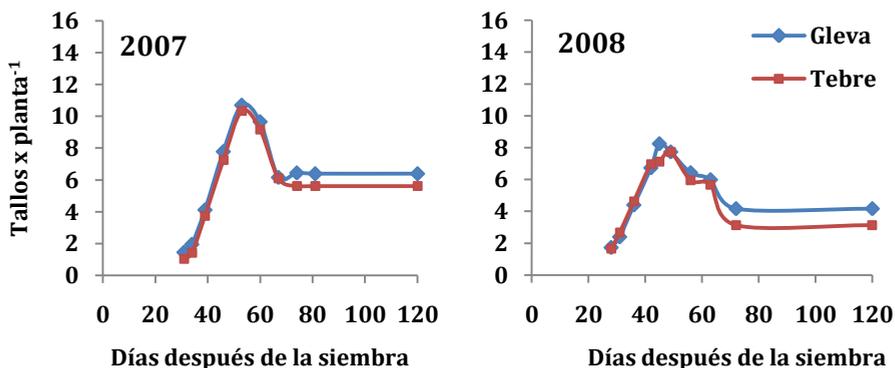
### **3.2.3.3 Factores que inciden en la dinámica del ahijamiento**

La producción de tallos es un proceso dependiente de parámetros agronómicos como la aportación de nutrientes, la densidad de planta (Yoshida, 1981) y el manejo del agua (Sasaki y Toriyama, 2006). A continuación se describen los resultados obtenidos sobre la evolución de número de tallos en la planta de arroz a lo largo del cultivo en diferentes condiciones de manejo de agua, momento de fertilización nitrogenada (Experimento 1) y densidad de planta (Experimento 2). También se evaluó capacidad de ahijamiento de dos variedades extensamente cultivadas en la zona arrocería del Delta del Ebro (Experimento 2).

#### **3.2.3.3.a Variedades**

Para evaluar la capacidad de ahijamiento de las variedades Gleva y Tebre, se analizó la evolución del número de tallos de la planta en la menor dosis de siembra (Fig. 32).

Los resultados mostraron la misma capacidad de ahijamiento, alcanzando el mismo número máximo de tallos (10.5 y 8 tallos x planta<sup>-1</sup> en 2007 y 2008, respectivamente). Estos resultados motivaron la decisión de dejar de incluir el factor varietal en el diseño experimental de 2009.



**Fig. 32 Capacidad de ahijamiento de las variedades Gleva y Tebre en los años 2007 y 2008.**

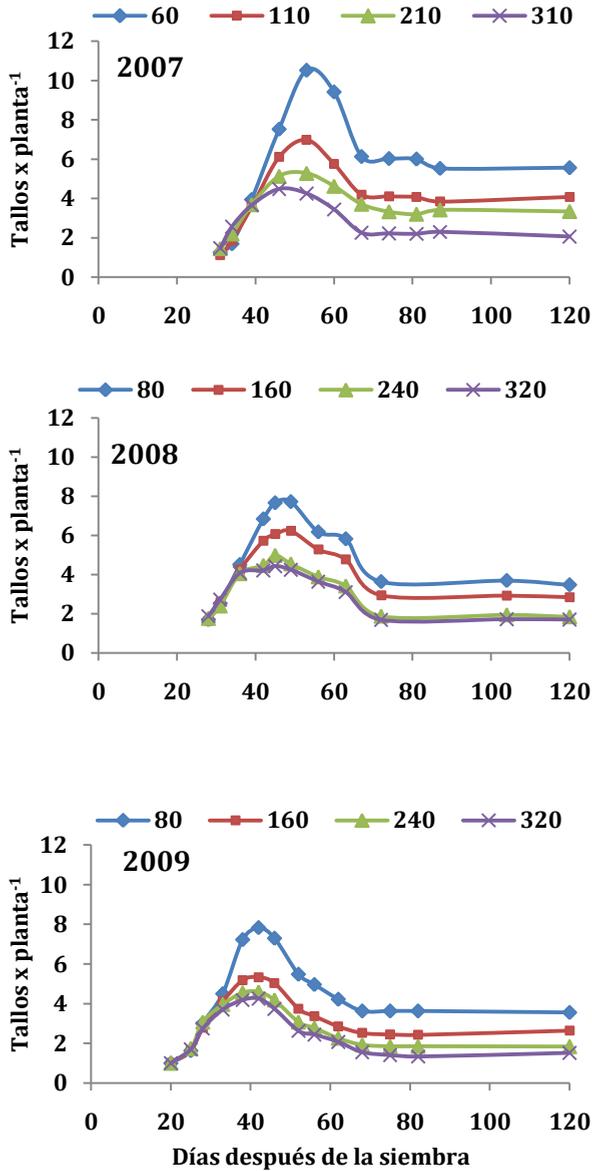
Kim y Vergara (1990) compararon dos variedades según su capacidad ahijadora y observaron que ésta dependía de la tasa de emergencia de los tallos. Además, observaron correlación de este carácter con la eficiencia, de manera que la variedad con mayor capacidad de ahijamiento mostró eficiencias inferiores debidas, según los autores, a la mayor tasa de aparición de tallos. Comparando Gleva y Tebre, aunque las dos pertenecen a la misma subespecie, esto es japónica, y muestran la misma capacidad ahijadora, Gleva presenta una leve superioridad en la eficiencia respecto Tebre (55.3 vs 53.7 y 44.5 vs 40.4 en 2007 y 2008, respectivamente) aunque no de forma significativa. Nuruzzaman *et al.* (2000) relacionaron la altura de la planta y el área específica foliar de las variedades con el número máximo de tallos, de forma positiva en el primer carácter y negativa en el segundo. Esta relación se extendió hasta la eficiencia del ahijado siendo superior en las variedades con menor número máximo de tallos (NMT) y, consecuentemente, con menor estatura. En nuestro caso, coincide la relación positiva entre la estatura de la planta (valores medios según empresa distribuidora: 50 y 100 cm en Gleva y Tebre, respectivamente) y

la eficiencia, sin presentar ningún vínculo intermedio con el NMT. Según Nuruzzamman *et al.* (2000), las variedades de menor altura producían hojas más delgadas que reducirían el grado de competitividad entre tallo principal y tallos primarios respecto las variedades altas con hojas más gruesas, repercutiendo en la eficiencia del ahijado. No se determinó el área foliar específica, por lo que no se puede comprobar la relación establecida entre la estatura y grosor de las hojas.

#### ***3.2.3.3.b Densidad de planta***

La figura 33 muestra la evolución del número de tallos en las plantas de seguimiento desde el inicio del ahijamiento hasta la maduración a diferentes dosis de siembra.

La influencia de la densidad de planta empezó a notarse alrededor de los 40 DDS (46, 36 y 42 DDS en 2007, 2008 y 2009, respectivamente) o en el octavo, séptimo o noveno estadios foliares, en orden cronológico.



**Fig. 33 Dinámica del ahijamiento a diferentes densidades de planta (2007-2009).**

Los valores de la leyenda indican las dosis de siembra (kg semilla x ha<sup>-1</sup>).

En la tabla 25 se exponen los valores referentes a las dosis de siembra, densidad de planta y parámetros que caracterizan la dinámica del ahijamiento en planta. Los años 2008 y 2009 mostraron comportamientos muy parecidos en cuanto a la evolución del número de tallos entre los tratamientos. En estos años, los tratamientos de 240 y 320 kg semilla x ha<sup>-1</sup> no mostraron diferencias, consiguiendo valores de máximo número de tallos (NMT) de 5.2 y 4.5 tallos x planta<sup>-1</sup> en 2008 y 2009, respectivamente (valor promedio de los dos tratamientos). En 2007, los dos tratamientos de mayor dosis de siembra (210 y 310 kg semilla x ha<sup>-1</sup>) sí mostraron comportamientos diferenciados, aunque sin diferencias significativas en el número máximo de tallos (5.6 y 4.2 tallos x planta<sup>-1</sup> en 210 y 310 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Estas ligeras diferencias en el comportamiento se explican por los diferentes porcentajes de establecimiento de planta obtenidos que originaron diferentes densidades de planta. Por ejemplo, utilizando la misma dosis de siembra en 2007 y 2008 de 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, la densidad de planta fue de 129 y 244 plantas x m<sup>-2</sup>, respectivamente. Por otro lado, hay que tener en cuenta la mayor heterogeneidad de planta obtenida en 2007 reflejada en los mayores valores de desviación estándar.

En los tres años, se observaron los mayores valores de NMT se registraron en las dosis de semilla más bajas (10.8, 8.5 y 8.1 tallos x planta<sup>-1</sup> en 2007, 2008 y 2009, respectivamente) así como un retraso en este momento.

El mayor NMT obtenido en menores densidades de planta fue debido a un mayor intervalo de tiempo hasta alcanzar esta fase y a una tasa de emergencia de tallos (TET) más rápida. En sorgo, Lafarge y Hammer (2002) concluyeron que la emergencia de los tallos se desarrollaba hasta que el área de la cubierta

foliar alcanzaba un determinado LAI crítico (LAIc) que fue cuantificado en 0.64. Por otro lado, también viene determinada por la concentración de nitrógeno foliar en el sentido que la emergencia tiene lugar hasta alcanzar una concentración crítica (Kim y Vergara, 1990; Sasaki y Toriyama, 2006). Por consiguiente, los resultados obtenidos indican una mayor disponibilidad de nutrientes y asimilados y, consecuentemente, menores niveles de competencia en menores densidades de planta. Un mayor número de plantas reduciría la captación de nitrógeno por planta a causa de los efectos de competencia intraespecífica y, junto con la consecución más temprana del LAIc, se redujo la capacidad de ahijamiento.

En referencia al número de panículas, la densidad de planta mostró una relación negativa con el número de panículas. Los años 2008 y 2009, volvieron a mostrar valores promedio entre densidades de planta muy parecidos, con diferencias menores de 0.2 tallos dentro del mismo tratamiento. Se calculó la media de los dos años para cada dosis de siembra y se obtuvo un rango de valores comprendido entre los 1.6 y 3.6 tallos x planta<sup>-1</sup> en 320 y 80 kg semilla x ha<sup>-1</sup>. En 2007, el rango de valores fue más amplio a pesar de pertenecer a un rango de densidad de planta menor (53-250 plantas x m<sup>-2</sup>), con valores entre los 2.1 y 5.4 tallos x planta<sup>-1</sup>. Este comportamiento es consecuencia de la mayor heterogeneidad en la distribución de las plantas en las parcelas.

Por tanto, la respuesta de la planta a diferentes densidades de planta en número máximo de tallos es superior que en número de panículas, con una amplitud del intervalo de NMT de 6.6, 3.6 y 3.8 tallos x planta<sup>-1</sup> y de 2.3, 1.8 y 2.1 panículas x planta<sup>-1</sup> en 2007, 2008 y 2009, respectivamente.

En cuanto a la eficiencia del ahijamiento, los tres años mostraron de forma clara la relación inversa entre la densidad de planta y la supervivencia de los tallos también observada por Kim y Vergara (1990), Pasuquin, *et al.* (2008) y Valério, *et al.* (2008). Estos resultados están relacionados con los menores niveles de competencia dentro de la propia planta que permiten mejorar la supervivencia y productividad de los tallos.

**Tabla 25 Número máximo de tallos a diferentes densidades de planta en tres años de ensayos.**

Año	Dosis semilla	DPL	NMT		TET	NP	Eficiencia ahijamiento
			DDS	NT			
2007	60	53	46	10.8±2.9a	2.5±0.7a	5.4±1.8a	51.6±15.5
	160	129	46	6.1±1.3b	3.6±0.7a	3.5±0.9b	57.6±7.7
	210	166	46	5.6±1.6b	3.9±1.1ab	3.3±1.0b	61.9±15.5
	310	250	39	4.2±0.9b	5.1±1.3b	2.1±0.8b	47.5±10.1
				*	*	*	ns
2008	80	157	42	8.5±0.7a	2.8±0.3a	3.5±0.7a	40.9±7.6
	160	244	42	6.8±1.3b	4.3±1.3b	2.8±1.5b	40.7±10.5
	240	344	36	5.4±0.5bc	4.7±0.5b	1.8±0.7bc	33.1±10.0
	320	480	36	4.9±0.8c	4.8±0.5b	1.7±0.8c	33.9±11.5
				*	*	*	ns
2009	80	133	46	8.1±0.6a	2.7±0.1a	3.6±0.2a	43.8±2.2ab
	160	222	38	5.5±0.4b	4.2±0.6b	2.6±0.2b	48.2±4.7a
	240	394	38	4.6±1.4bc	4.5±1.1b	1.8±0.3c	40.5±6.1bc
	320	463	38	4.3±0.7c	4.8±0.7b	1.5±0.1c	35.6±5.8c
				*	*	*	ns

Acrónimos y unidades: dosis semilla (kg semilla x ha<sup>-1</sup>); DPL(densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); DDS(días después de la siembra); NT(número tallos, tallos x planta<sup>-1</sup>); TET(tasa emergencia de los tallos, días x tallo<sup>-1</sup>); NP(número panículas, panículas x planta<sup>-1</sup>), Eficiencia ahijamiento(%).

### 3.2.3.3.c Fertilización nitrogenada y manejo de agua

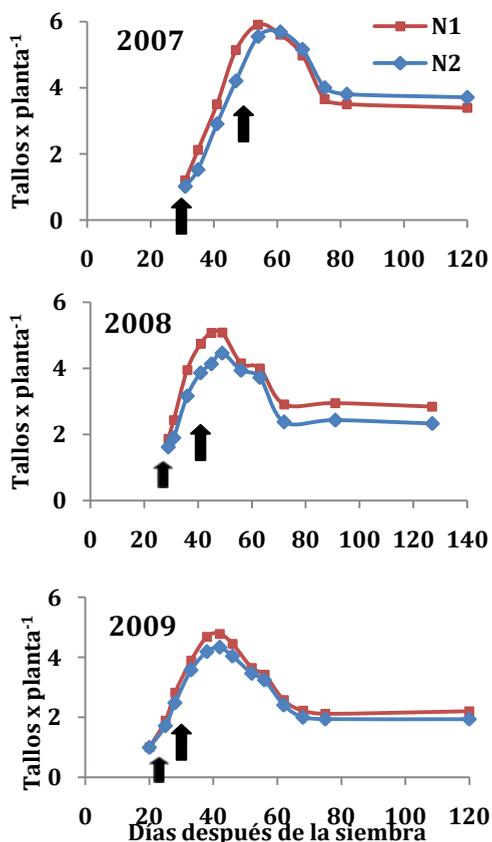
Se analizó la influencia de cada uno de estos factores así como de su interacción sobre la dinámica de ahijamiento en planta.

Los resultados del análisis mostraron que mientras que el efecto del factor nitrógeno se mantuvo estable, el del manejo de agua presentó cierta variabilidad.

Se observó que las plantas con una aportación de nitrógeno en inicio de ahijamiento (N1) emitían un mayor número de tallos y más prematuramente que las plantas con una aportación más tardía (N2) (Fig.34). Las diferencias más importantes y también significativas en el número máximo de tallos (NMT) se dieron en 2008, con  $5.1 \pm 1.6$  tallos  $\times$  planta<sup>-1</sup> en N1 respecto los  $4.1 \pm 1.3$  en N2 (LSD,  $p < 0.05$ ). Las diferencias en 2009 se localizaron alrededor de la fase de máximo ahijamiento indicando que en condiciones de buen establecimiento de planta, el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el desarrollo de las yemas en las posiciones más bajas pierde importancia porque la diferenciación de los tallos es casi completa. Por otro lado, el avance de la fase de máximo ahijado en 2009 hizo que la fecha de abonado correspondiente al tratamiento N2 prácticamente coincidiera con esta fase, por lo que no se pudo observar ninguna respuesta en el ahijado en este tratamiento. El comportamiento observado en las plantas a una aportación precoz de nitrógeno pone de manifiesto el fuerte requerimiento de este elemento por parte de la planta para la producción de tallos en el inicio del desarrollo (Peng et al., 1994; citado en Pasuquin, *et al.*, 2008).

La fase de máximo ahijamiento sucedió a los 54, 45 y 38 DDS en 2007, 2008 y 2009, respectivamente, sin mostrar diferencias significativas entre tratamientos. A partir de estos resultados se concluyó que el mayor NMT en N1 fue debido a una tasa de aparición de tallos más rápida (Abeledo, *et al.*, 2004) y, además, se puso de manifiesto la mejora en la disponibilidad de recursos

(Dinkuhn y Kropff, 1996). Este cambio en la tasa de ahijamiento hace referencia a la totalidad de los tallos (primarios y secundarios) puesto que no hay diferenciación en los primarios.



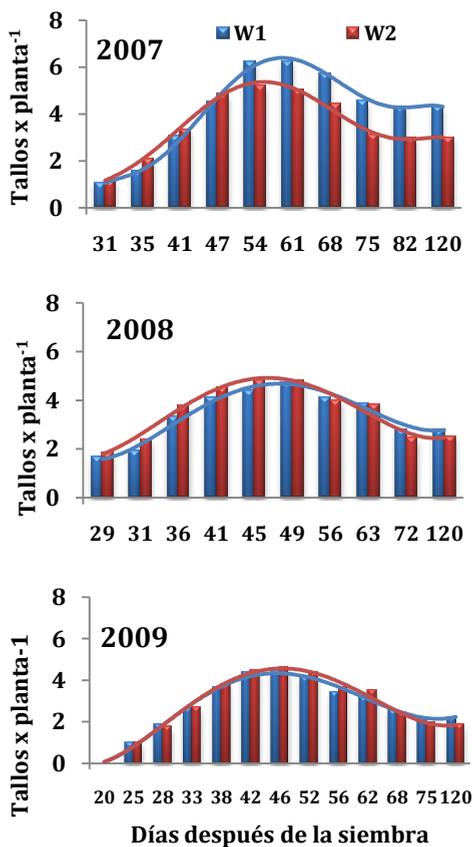
**Fig. 34 Influencia del momento de fertilización nitrogenada en la dinámica del ahijamiento en planta en los años 2007 hasta 2009.** Las flechas indican el momento de aplicación del abono nitrogenado según el tratamiento: N1 y N2 correspondiendo al principio y mediados del ahijado, respectivamente.

En la figura 35 se muestra la respuesta de la dinámica del ahijamiento al manejo de agua. Como se puede observar, la respuesta difirió los dos primeros

años, mientras que en 2009 fue prácticamente inexistente. En 2007 y 2008, se observó que el riego intermitente a 3 cm de profundidad (W2) favorecía el ahijamiento respecto la lámina continua de 7 cm (W1), presentando valores medios de tallos por planta superiores en cada día de valoración. Sin embargo, la fase de máximo ahijamiento difiere en los dos años de manera que 2008 se mantiene la superioridad en W2 ( $4.4 \pm 1.2$ ,  $4.8 \pm 1.8$  en W1 y W2, respectivamente) mientras que en 2007 se invierten los valores y W1 obtuvo un valor significativamente superior ( $6.2 \pm 2.8$ ) que W2 ( $4.8 \pm 2.3$ ). El mayor número máximo de tallos obtenido en W1 fue debido a la mayor duración del ahijamiento puesto que, según el análisis estadístico, la fase de máximo ahijamiento en W2 sucedió a los 45 DDS, mientras que en W1a los 54 DDS. Al alargar la fase del ahijamiento, se desarrollaron las yemas primarias de nudos superiores y, a la vez, aumentan las oportunidades del desarrollo de secundarios, permitiendo de esta forma aumentar el número de tallos acumulados (Matsuba, 1988; citado en Sasaki y Toriyama, 2006). En la sección 3.2.2.1 se mostraba el mayor porcentaje de tallos secundarios producidos en W1 (22%) que en W2 (14%) en 2007 así como la mayor proporción de desarrollo de yemas de nudos de posiciones superiores, concretamente a partir de T6.

La explicación del comportamiento observado en 2007 reside en los efectos de la aplicación de herbicida (aplicación de Propanil, 35% a los 19 y 21 DDS para combatir *Echinochloa*) y la consecuente la intervención del factor manejo de agua. El estado de las plantas en las primeras etapas del desarrollo vegetativo se vio afectado por la acción del herbicida que dañó las primeras hojas y como consecuencia el desarrollo de sus yemas. En el caso de W1, el efecto del herbicida se sumó al de la lámina de agua para la limitación del desarrollo de

tallos de posiciones bajas, favoreciendo todavía más la emergencia de nudos más tardíos y alargando el periodo del ahijamiento. Los efectos de W2 sobre el ahijamiento precoz promovieron el desarrollo de unos tallos débiles debido el mal estado de las hojas del tallo principal, repercutiendo en su rendimiento tal y como se verá en la sección 3.2.3.



**Fig. 35 Influencia del momento del manejo de agua en la dinámica del ahijamiento en planta en los años 2007 hasta 2009.**

El vigor precoz del cultivo observado en 2009 podría haber anulado los posibles efectos del manejo de agua sobre el ahijamiento por haber conseguido

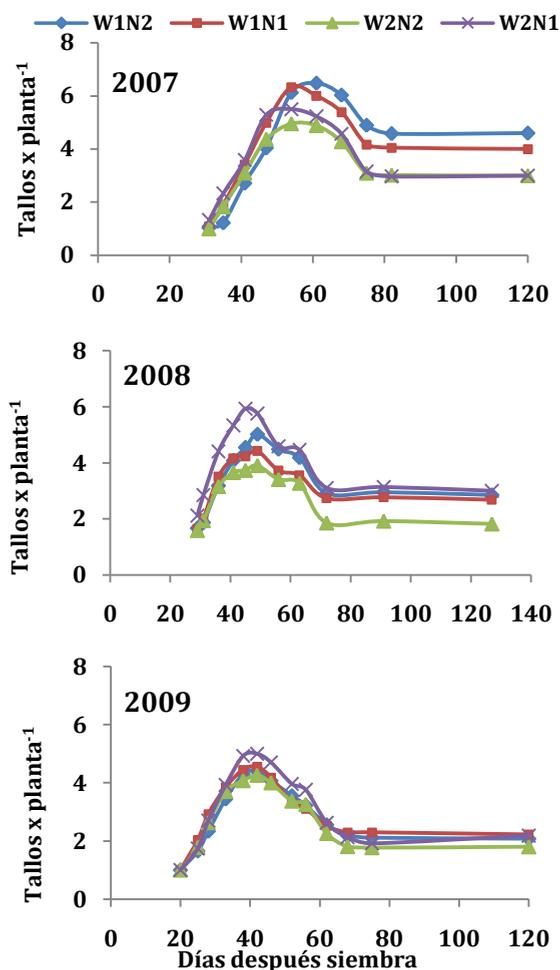
el máximo desarrollo de las yemas sin posibilidad de mejora, tal y como se comentó en el efecto del momento del abonado nitrogenado.

Se analizó también los efectos de la interacción entre manejo de agua y fertilización nitrogenada. En la tabla 26 se exponen los valores de los diferentes parámetros que caracterizaron la dinámica del ahijamiento: tasa emergencia de los tallos (TET), fase máximo ahijamiento (número de tallos y momento en el se tuvo lugar) y número de tallos. No se incluye en esta tabla el momento del inicio del ahijamiento porque es invariable en los diferentes tratamientos ya que fue a partir de este momento cuando se aplicaron los diferentes tratamientos.

**Tabla 26. Influencia de la interacción entre manejo de agua y fertilización nitrogenada en las distintas fases del ahijamiento (2007 - 2009).**

Año	Tratamiento	TET	FMA		Número de panículas
			DDS	NT	
2007	W1N1	4.4±0.13	54	6.4±0.36	4.0±1.55
	W1N2	4.3±0.62	54	6.5±1.49	4.5±1.80
	W2N1	4.1±0.31	47	6.0±1.38	2.9±1.17
	W2N2	5.1±0.85	47	5.7±1.81	3.0±0.78
		ns	*	ns	ns
2008	W1N1	4.8±0.64	45	4.7±0.64 ab	2.7±0.58 ab
	W1N2	5.0±0.93	45	5.2±0.85 ab	2.9±0.39 ab
	W2N1	4.5±0.60	45	6.1±0.65 a	3.0±0.76 a
	W2N2	6.1±1.99	45	4.2±0.85 b	1.8±0.40 b
		ns	ns	*	*
2009	W1N1	5.4±0.14 a	42	4.8±0.89	2.2±0.48
	W1N2	5.3±0.49 a	42	4.4±0.72	2.1±0.46
	W2N1	4.2±0.83 b	42	5.0±0.48	2.2±0.54
	W2N2	5.7±0.55 a	42	4.3±0.45	1.8±0.28
		*	ns	ns	ns

**Acrónimos y unidades:** TET( tasa emergencia tallos, días x tallo-1); FMA(fase máximo ahijado); DDS(días después de la siembra); NT(número de tallos, tallos x planta<sup>-1</sup>); ns(no significativo).\*Diferencia significativa a P<0.05 dentro del mismo año.



**Fig. 36. Influencia de la interacción entre manejo de agua y fertilización nitrogenada en la dinámica del ahijamiento en planta en los años 2007 hasta 2009.**

El comportamiento del ahijamiento en 2007 volvió a mostrar patrones diferentes a los observados en 2008 y 2009. En estos dos últimos años, la

combinación riego intermitente y fertilización precoz (W2N1) promovió el ahijamiento de la planta consiguiendo un mayor número máximo de tallos (NMT), aunque sólo de forma significativa en 2008 (Tabla 26). Esta superioridad vino explicada por una tasa de emergencia más rápida en estas condiciones (4.5 y 4.2 días x tallo<sup>-1</sup> en 2008 y 2009, respectivamente) que en W2N2, donde los tallos necesitaron más días para su aparición (6.1 y 5.7 días x tallo<sup>-1</sup> en 2008 y 2009, respectivamente). Consecuentemente, W2N2 presentó los valores más bajos de NMT. En cambio, en 2007 aunque las tasa de emergencia mantuvo el mismo comportamiento con valores mínimos en W2N1 (4.1 días x tallo<sup>-1</sup>) y máximos en W2N2 (5.1 días x tallo<sup>-1</sup>) el mayor NMT tuvo lugar en condiciones de lámina continua (6.4 y 6.5 tallos x planta<sup>-1</sup> en W1N1 y W1N2, respectivamente), indicando que fue la mayor duración del ahijamiento la causa de la superioridad en el número de tallos.

Por tanto, se detectó una interacción (significativa en el caso de 2008, ver tabla 26) entre el manejo de agua y la fertilización nitrogenada para la tasa de aparición de tallos, de manera que la combinación W2N2 se presentó como la menos favorecedora para la producción de tallos en todos los años. Contrariamente, la combinación W2N1 mostró las tasas más rápidas señalando la abundancia de recursos (Dingkuhn y Kropff, 1996, citado en Kariali, *et al.*, 2008) gracias a la aportación precoz de nitrógeno así como su buena disponibilidad promovida por W2. El estímulo del ahijamiento precoz originado en W2 mejoró el desarrollo del sistema radicular y de la cubierta foliar (Yoshida, *et al.*, 1982), permitiendo una mayor captación de nutrientes y de la radiación solar. Contrariamente, la fertilización tardía contrarrestó los efectos positivos de W2 en el estímulo del ahijamiento precoz como consecuencia de un desacople en las respuestas de las plantas a estas dos técnicas de cultivo: W2

promovió el desarrollo de las yemas pero todavía no había disponibilidad de nitrógeno.

Se analizó la influencia de la fertilización nitrogenada, del manejo de agua y su interacción sobre la eficiencia del ahijamiento. El manejo del agua mostró efectos significativos sobre el porcentaje de tallos productivos, mostrando valores superiores en condiciones de lámina continua a 7 cm (Tabla 27). En 2007 y 2008, los porcentajes obtenidos en W1 fueron 10 puntos significativamente superiores que en W2, y en 2009 la eficiencia media fue 4 puntos superior si bien esta diferencia no llegó a ser significativa. Por lo tanto, se observó un claro efecto favorecedor de la lámina continua a la supervivencia de los tallos.

**Tabla 27 Influencia del manejo de agua en la eficiencia del ahijamiento del arroz (%) en los años 2007-2009.**

Año	Manejo de agua	
	W1	W2
2007*	62.1±10.23	51.7±9.62
2008*	56.1±8.31	46.2±9.53
2009	46.8±4.40	42.7±6.18

\*Diferencias significativas a  $P < 0.05$  (LSD)

Pasuquin, *et al.* (2008) relacionaron la eficiencia del ahijamiento con el vigor de la planta. Observaron como plántulas que se habían trasplantado en estadios más primerizos mostraban un mejor vigor pero al final tenían una eficiencia del ahijamiento más baja a causa de una excesiva producción de tallos. El mayor

crecimiento vegetativo favorecido por W2 provocó un aumento excesivo del área foliar que desembocó una disminución de la eficiencia del ahijamiento por los efectos de sombreado entre las hojas de la misma planta (Zhong, *et al.*, 2002) y por una menor concentración de nitrógeno (Wu, *et al.*, 1998), con el resultado final de un menor porcentaje de tallos productivos. No obstante, en 2007 el mayor crecimiento vegetativo tuvo lugar en W1, con un mayor número máximo de tallos y sin embargo, también fue el tratamiento con mejor eficiencia del ahijamiento. Probablemente, en este comportamiento volvieron a intervenir los efectos del herbicida. Una de las consecuencias del retraso del ahijamiento fue la mayor presencia de tallos secundarios, cuya contribución a la cubierta foliar probablemente es menor que la de los tallos primarios. Consecuentemente, la planta, a pesar de tener un mayor número de tallos que en W2, mostró una mayor supervivencia de los tallos por tener una menor área foliar. Estos resultados obtenidos en 2007 coinciden con Pasuquin *et al.* (2008) quienes observaron que plántulas hasta un cierto grado de retraso en el ahijamiento presentaban eficiencias superiores. La explicación podría residir en la estructura del ahijado definida por el porcentaje de tallos según su categoría y en su contribución a la formación de la cubierta foliar. Mohapatra y Kariali (2008) observaron que la media del área foliar en los tallos secundarios era significativamente inferior a los primarios. En 2007 se observaron mayores porcentajes de tallos secundarios (ver sección 3.2.2.3.a) por lo que, para la misma área foliar, se necesitarían más tallos hasta alcanzar el LAI crítico (Zhong, *et al.*, 2002) a partir del cual cesa la aparición de tallos. Asimismo, Won, *et al.* (1999a) observaron que el nitrógeno foliar en la hoja bandera era superior en láminas profundas de aguas (25 cm) respecto las más superficiales (3 cm), lo que podría explicar también a través de este razonamiento la mayor supervivencia en W1.

Por otro lado, no se encontraron diferencias en la supervivencia de los tallos en los dos tratamientos de fertilización nitrogenada a pesar de obtener un mayor desarrollo vegetativo en aportaciones precoces de nitrógeno. Por tanto, si la mortalidad de los tallos está influenciada por el área foliar (Zhong, *et al.*, 2002) y por la concentración de nitrógeno en la planta (Zhong, *et al.*, 2003), los resultados aportados sugieren que el estímulo en el desarrollo vegetativo aportado por N1 no trascendió en ninguno de estos parámetros, por lo que no hubo respuesta en la eficiencia global de la planta.

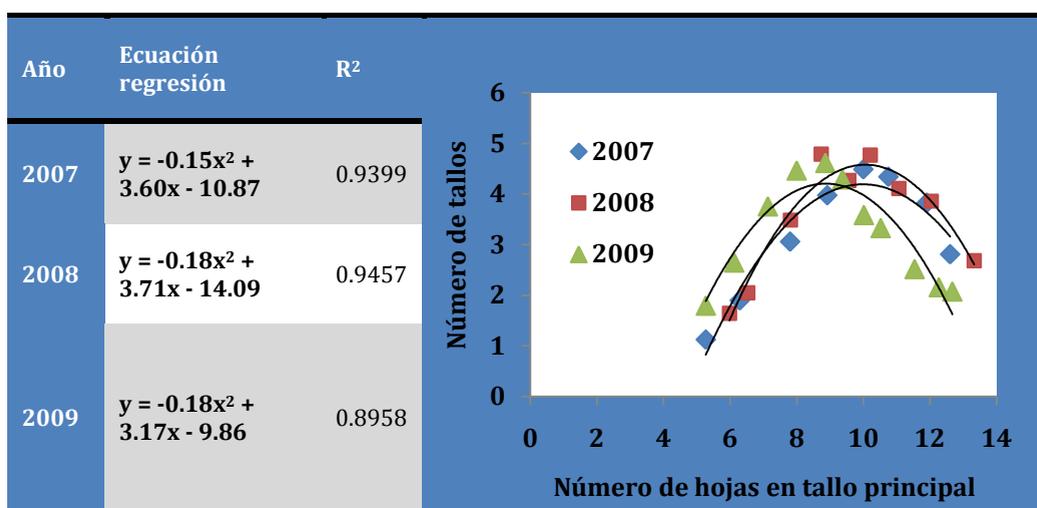
### **3.2.4 Sincronismo entre las dinámica del ahijado y el desarrollo foliar en el tallo principal**

Estudios previos han demostrado la relación y sincronismo establecido entre la dinámica del ahijamiento y el desarrollo foliar en arroz (Matsuo y Hoshikawa, 1993; Nemoto, *et al.*, 1995) y otros cultivos como maíz (Kirby, 1990).

El objetivo de esta parte de la tesis fue comprobar y evaluar el grado de sincronismo entre el desarrollo foliar y el ahijamiento en la planta de arroz en las condiciones del estudio.

Para el análisis de los resultados de este apartado no se consideraron los datos de 2006 porque el número final de hojas registrado fue 14.5, mientras que la media de los años siguientes fue 13. Como este valor que no se volvió a repetir en los tres años sucesivos y que provocó cierta desconfianza. El número final de hojas producidas per el tallo principal interviene en la determinación del número potencial de tallos acumulados, por lo que es importante partir de valores fiables para la estimación del comportamiento del ahijamiento a partir del desarrollo foliar.

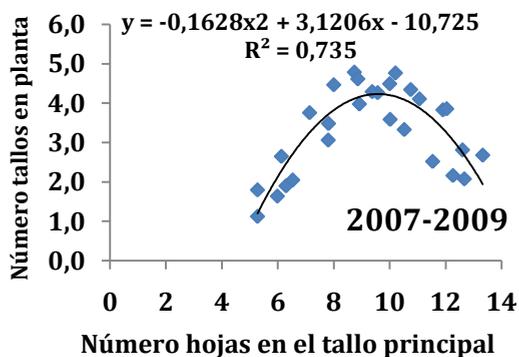
Para cada año, se hizo un análisis de regresión entre el número de hojas del tallo principal y el número de tallos resultando una función polinómica de segundo grado (Fig.37) con buenos niveles de ajuste en los tres años. Los dos primeros años se obtuvieron valores del coeficiente de determinación altos, alrededor de 0.94 mientras que 2009 bajaron a 0.90. El menor nivel de ajuste fue provocado porque el número máximo de tallos estimado fue inferior al observado y al revés a partir del estadio de 10 hojas. Las desviaciones sugieren una producción de tallos superior a la estimada y una mortalidad inferior.



**Fig. 37 Relación entre número de hojas en el tallo principal y de tallos en planta en los años 2007-2009.**

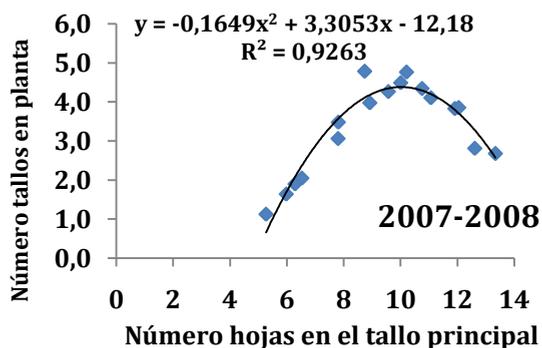
Con el objetivo de aportar una herramienta para la predicción de los diferentes estadios de la fase del ahijamiento, con los datos observados en estos tres años se construyó una única curva para valorar el grado de ajuste de la ecuación (Fig. 38). Se obtuvieron unos niveles de ajustes aceptables del 74%, pero que podían ser mejorados si se diferenciaba el comportamiento de 2009 de los

otros dos años, con tasas de crecimiento más altas tal y como se podía detectar en la figura 37.



**Fig. 38 Ajuste de la función polinómica de segundo grado para la relación entre desarrollo foliar y dinámica del ahijado en los años 2007, 2008 y 2009.**

Efectivamente, la parábola derivada de los datos de 2007 y 2008 conseguía un nivel de ajuste superior, con  $R^2$  de 0.93 (Fig.39).



**Fig. 39 Ajuste de la función polinómica de segundo grado para la relación entre desarrollo foliar y dinámica del ahijado en los años 2007 y 2008.**

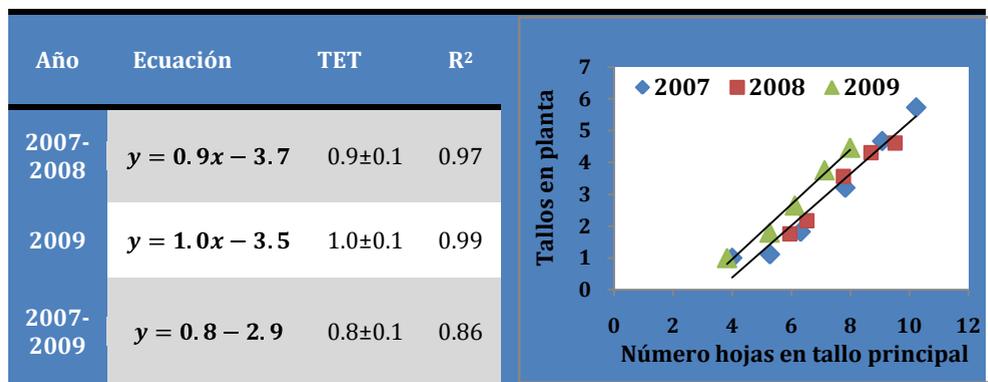
Por lo tanto, se comprobó que ciertamente existía una relación entre el desarrollo foliar y el ahijamiento de la planta que se describió mediante una función cuadrática de la expresión:

$$y = -0.1628x^2 + 3.12x - 10.7 \qquad Ec 5$$

Otros autores han descrito previamente la existencia de una relación sincrónica entre la dinámica foliar y la del ahijamiento (Jaffuel y Dauzat, 2005; Hanada, 1993). No obstante, en el presente trabajo se pudo detectar también la influencia del estado de las plántulas en el inicio del ahijamiento al ver que los ajustes mejoraban cuando se utilizaban datos pertenecientes a los años con mayor similitud del estado del cultivo. Por tanto, el estado del cultivo debe tenerse en cuenta para la estimación de la evolución del ahijamiento.

Seguidamente, el análisis se centra en la fase de emergencia de los tallos, esto es desde el inicio hasta la fase de máximo ahijamiento, donde se obtuvo una

relación lineal con diferentes pendientes en respuesta a los diferentes estados del cultivo (Fig.40).



**Fig. 40 Relación sincrónica entre el desarrollo foliar y el número de tallos durante la emergencia de tallos.** Acrónimos y unidades: TET (tasa emergencia tallos, tallos x hoja<sup>-1</sup>)

En 2007 y 2008, donde las plántulas presentaron menor vigor, se produjeron 0.9 tallos por cada hoja en el tallo principal, mientras que en el 2009 esta relación aumentó hasta 1 tallo por hoja (fig.40). Una tasa de emergencia menor de 1 tallo por hoja, señala que alguna yema del tallo principal no pudo desarrollarse, indicando la peor situación del cultivo respecto 2009. La recta derivada de los tres años de datos indicó una tasa de aparición de de 0.8 tallos x hoja<sup>-1</sup>, con un ajuste del 86%, aportando de esta manera un buen instrumento para la estimación de la emergencia de los tallos a partir del desarrollo foliar.

### 3.2.5 Productividad de los tallos

En las secciones anteriores se ha estudiado la dinámica del ahijamiento en planta durante la fase vegetativa, desde el inicio de la producción de tallos hasta

el momento en que el número de tallos productivos es fijado, y evaluando el balance global de este proceso mediante la eficiencia del ahijamiento. En esta sección se pretende conocer las características de los tallos productivos, en adelante panículas, tanto a nivel individual como considerando la globalidad de la planta. Para el primer nivel de estudio se determinó la supervivencia de los tallos así como el rendimiento y sus componentes en las panículas según su categoría (tallo principal o tallos primarios) y posición. La localización de los órdenes que van a desarrollar tallos así como la proporción de los productivos es fundamental para la comprensión de la formación del rendimiento. El segundo nivel de estudio consiste en la integración de los conceptos anteriores para así poder evaluar la contribución de cada panícula en el rendimiento de la planta. Este conocimiento permitirá una mejor comprensión de la repercusión de la dinámica del ahijamiento en la producción de la planta y del cultivo. Al mismo tiempo, el estudio de la influencia de los factores agronómicos y varietales en este proceso permitirá ofrecer técnicas de cultivo que permitan un buen control del ahijamiento del arroz que pueda repercutir positivamente en la eficiencia del cultivo.

Los resultados presentados corresponden a los valores medios de las valoraciones realizadas a las plantas de seguimiento de los marcos de monitorización de los experimentos 1 y 2, según corresponda.

#### **3.2.5.1 Tasa de supervivencia o productividad de las panículas**

La tasa de supervivencia de los tallos (TST) es la probabilidad que un tallo en una posición dada sea productivo, es decir, acabe desarrollando una panícula. En su cálculo intervienen dos términos: el primero es la frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY) que es la probabilidad de que la yema de cada

fitómero crezca y se convierta en tallo y el segundo, es la frecuencia productiva de los nudos (FPN) que es la proporción de panículas por nudo en una planta de arroz. La TST es el producto de la frecuencia de desarrollo de las yemas y la productividad de los nudos y por tanto se define como la probabilidad de que en un nudo la yema se desarrolle y, además, el tallo llegue a ser portador de panícula. Antes de continuar en el análisis de estos resultados, se pretende aclarar que el término productividad utilizado en esta sección hace referencia a la proporción de panículas en planta y a la supervivencia de los tallos sin aludir al rendimiento de las panículas.

En la tabla 28 se muestran los valores medios para cada término de los tres años de experimentación en los nudos primarios.

**Tabla 28 Frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY), frecuencia productiva de los nudos (FPN) y tasa de supervivencia de los tallos (TST) en los años 2007 hasta 2009.**

	2007			2008			2009		
Nudo	FDY	FPN	TST	FDY	FPN	TST	FDY	FPN	TST
1	0.07	0.02	0.00	0.15	0.03	0.01	0.17	0.08	0.04
2	0.19	0.10	0.04	0.41	0.26	0.13	0.86	0.49	0.43
3	0.55	0.40	0.29	0.53	0.32	0.21	0.86	0.32	0.29
4	0.86	0.60	0.52	0.90	0.53	0.48	0.89	0.13	0.12
5	0.85	0.57	0.52	0.92	0.33	0.32	0.76	0.05	0.03
6	0.65	0.36	0.32	0.38	0.06	0.03	0.08	0.00	0.00
7	0.16	0.15	0.09	0.24	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
8	0.14	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00	--	--	--

Para simplificar la tabla, no se han incluido las desviaciones estándar.

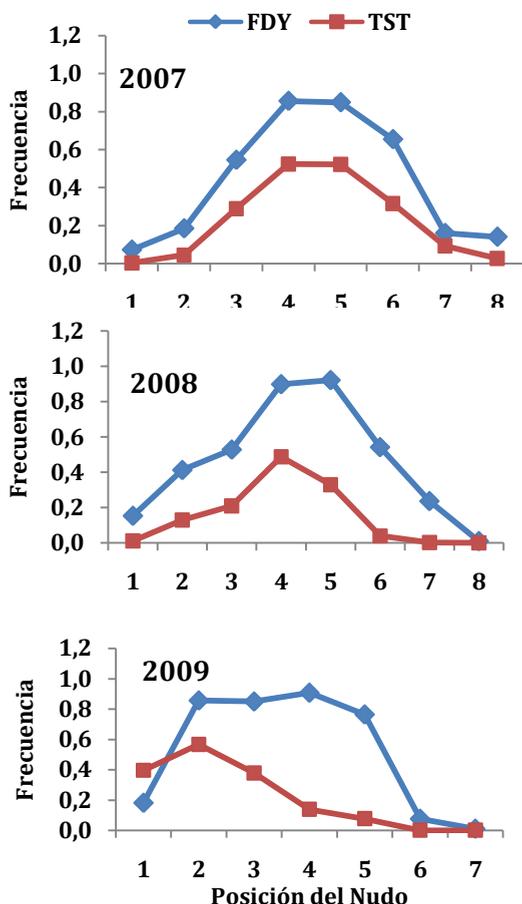
Los valores obtenidos para la frecuencia productiva de los nudos oscilaron entre el 0.02 y el 0.60. Por lo tanto, la probabilidad máxima de desarrollar una

panícula para cada posición de la planta fue del 60% aunque en ciertos años pudo no alcanzar ni el 50%, como en caso de 2009. Cuando a esta probabilidad se incluye la frecuencia de desarrollo de yemas, se obtiene la tasa de supervivencia de los tallos, cuyos valores en los tres años estuvieron comprendidos entre el 0 y el 45% de probabilidad de que un tallo en una posición concreta llegue a desarrollar panícula.

Según los resultados, la frecuencia productiva de los nudos depende de la frecuencia de desarrollo de sus yemas, sugiriendo que altas probabilidades de emergencia de los nudos son indicativas de su posterior viabilidad. Lafarge, *et al.* (2002) establecieron que el factor con mayor influencia sobre la supervivencia del ahijado precoz en sorgo era la asimilación de los recursos del tallo principal en el momento de su emergencia. Efectivamente, las elevadas tasas de supervivencia en las primeras posiciones en 2009 en contraposición con los dos años previos, señalan la mejor capacidad de las plantas para la captación de recursos.

Sin embargo, una elevada frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY) era una condición estrictamente necesaria para conseguir altas supervivencias pero no siempre suficiente. En la figura 41 se muestran los valores de FDY y TST para cada posición y año. Al comparar los 3 años, se observó que en 2007 y 2008, elevados valores para FDY iban seguidos de altas TST, manteniendo cierta proporcionalidad entre estos dos parámetros en casi todos los nudos. En cambio, en 2009 no se detectó esta sincronía entre FDY y TST sino que se observaron elevados índices de mortalidad registrados en posiciones que habían sido exitosas en cuanto al desarrollo de la yema, como fue el caso de los nudos 4 y 5. Esta situación también tuvo lugar aunque en menor medida en el

sexto nudo en 2007 y 2008, con FDY del 65 y 38% y TST finales del 32 y 3%, respectivamente. En común presentaron los tres años tasas de supervivencia muy bajas en las últimas posiciones.



**Fig. 41 Frecuencias de desarrollo de las yemas (FDY) y tasas de supervivencia de los tallos (TST) para los nudos primarios en 2007, 2008 y 2009.**

La mortalidad de los tallos ha sido estudiada por diferentes autores en diferentes cultivos herbáceos. Los principales factores que determinan la senescencia de los tallos son (citados en: del Moral y del Moral, 1995):

1. La competición por los recursos como agua, luz y nutrientes que crea una selección de los tallos con mayor capacidad de captación de los recursos. Diversos criterios han sido previamente definidos para evaluar la capacidad competitiva de los tallos como el número de hojas en el tallo (Kirby y Hones, 1977) o su altura relativa respecto el tallo principal en el momento del encañado (García del Moral *et al.*, 1984).

2. Baja tasa de crecimiento de las hojas (Davidson and Chevalier, 1990).

3. Calidad de la luz: una baja relación luz roja: luz roja lejana podría promover la mortalidad de los tallos (Davis y Simmons ,1994).

Estos parámetros no fueron evaluados en este trabajo, pero el comportamiento de 2009 respecto los años previos señala efectos de la competencia por los recursos relacionándose, una vez más, con el mayor vigor precoz. El desarrollo vegetativo más precoz de este año permitió un desarrollo de la cubierta foliar más temprano adelantando la competitividad por los recursos y provocando cambios en la calidad de la luz en la base de la cubierta (Sparkes, *et al.*, 2006). En condiciones de establecimiento del cultivo más retardado (2007 y 2008), sólo la frecuencia de desarrollo de las yemas intervino en la productividad de los tallos. Por consiguiente, se puso de manifiesto la influencia de la buena calidad de la plántula en el ahijado precoz en cuanto a su posterior productividad garantizando un buen estado para poder competir con posiciones posteriores.

Finalmente, cabe destacar que en los tres años las frecuencias productivas más altas se situaron en sólo dos posiciones, sugiriendo la existencia de un techo para la capacidad productiva de las plantas independientemente del número total de tallos producidos, y para un rango de dosis de siembra de 160 a 210 kg

semilla x ha<sup>-1</sup>. Kon, *et al.* (2003) observaron, en arroz trasplantado, comportamientos similares aunque con ciertos matices. En cuanto al desarrollo de los tallos, el patrón fue similar al de 2009, con FDY elevadas entre la segunda y séptima posiciones primarias, además de la tercera hasta la quinta posiciones secundarias. La productividad de los tallos se quedó limitada a tres posiciones (cuarta hasta la sexta). Por lo tanto, coincide en el techo productivo puesto que a pesar del gran número de yemas desarrolladas, sólo 3 consiguieron ser productivas. Desgraciadamente, se desconocen los detalles de este experimento por estar redactado en japonés, pero fue destacable la coincidencia en la estructura de la planta en la maduración a pesar de las notables diferencias durante el ahijado en planta, según el resumen del mismo artículo.

### 3.2.5.2 Rendimiento y sus componentes en planta y panículas según su posición

#### 3.2.5.2.a Rendimiento y componentes del rendimiento en planta

En la tabla 29, se exponen los resultados generales de cada año obtenidos en la valoración del rendimiento y sus componentes en la planta. Los valores corresponden a las medias globales de cada año del experimento 2 obtenidas a través de las valoraciones realizadas en las plantas de monitorización.

**Tabla 29 Rendimiento y componentes en las plantas de seguimiento.**

Año	DS	DPL	RendPI	NPPI	NGP	PMG	FertPI
2007	185	127.0±61.6	6.9±3.6	3.2±1.1	66.4±17.0	30.8±4.9	88.1±2.2
2008	185	222	5.1±1.5	2.6±0.7	69.6±24.7	29.6±4.2	84.3±9.7
2009	160	250	4.1±0.9	2.1±0.5	60.9±24.6	31.8±2.9	92.3±4.9

Unidades y acrónimos: DS (Dosis de siembra, kg semilla x ha<sup>-1</sup>); DPL (densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); RendPI (rendimiento en planta, g); NPPI: (número panículas por planta); NGP(número granos por panícula); FertPI (fertilidad en panícula, %). Media±desviación estándar.

Las densidades de planta obtenidas cada año explicaron las diferencias en el rendimiento medio que, a su vez, fue función del número de panículas por planta (NPPI), el número de granos por panícula (NGP), peso mil granos (PMG) y la fertilidad media de las panículas (FertPI). Se compararon los años 2008 y 2009 por tener densidades de planta similar y homogénea. La estimación del rendimiento del cultivo a partir del obtenido en la planta y la densidad de planta resultó en una superioridad en 2008 (1131 g x m<sup>-2</sup>) respecto 2009 (1025 g x m<sup>-2</sup>). Sin embargo, los datos obtenidos en el cultivo indicaron una situación opuesta (960 y 1000 g x m<sup>-2</sup>) tal y como se muestra en la sección 3.3. A partir de estas observaciones, se deduce que en 2008 pudieron haber muerto plantas durante el cultivo mientras que en 2009 gracias al vigor precoz del cultivo, se garantizó la estabilidad y supervivencia de plantas a lo largo del ciclo.

El número medio de panículas por planta osciló de las 2.1 en 2009 hasta las 3.2 en 2007 (se incluye el TP), por tanto, entre 1 y 2 tallos primarios llegaron a ser productivos. La superioridad de 2007 se explica por la menor densidad de planta (127 plantas x m<sup>-2</sup>) comparada con 2008 y 2009 (222 y 250 plantas x m<sup>-2</sup>, respectivamente). El año 2009, con menor número de panículas en planta, presentó las panículas más pequeñas (NGP), y, en cambio, el peso medio de mil granos fue superior (31.8 g en 2009 respecto 29.6 y 30.8 en 2007 y 2008, respectivamente). De ahí se deduce que el tamaño del grano debía ser mayor en 2009 que en 2008. Fueron también destacables los altos valores de desviación estándar en el NGP y PMG, mostrando una gran heterogeneidad de este parámetro a nivel de planta que indicaba la influencia de la estructura jerárquica, esto es órdenes y categorías de tallos, en el tamaño de la panícula. La

fertilidad media de las panículas fue sensiblemente superior en 2009, con un 92 % de granos llenos respecto el 88 y 84% en 2007 y 2008, respectivamente.

### 3.2.5.2.b Rendimiento y componentes del rendimiento en panícula.

En la tabla 30 se exponen los resultados generales de cada año obtenidos mediante la valoración del rendimiento y componentes del rendimiento en panícula según su posición. Los valores corresponden a las medias globales de las panículas obtenidas cada año del experimento 2.

**Tabla 30** Peso de la panícula (g), número granos por panícula (NGP) y fertilidad según la posición de la panícula (FertP) en los años 2007-2009.

Año	Categoría/ Posición panícula	Peso panícula	NGP	FertP
2007	TP	2.29±0.6*	73.6±18.3*	86.1±8.8
	1	1.82±0.7	56.3±22.9	87.0±5.0
	2	1.77±1.0	55.9±31.6	89.7±9.0
	3	1.79±0.7	56.7±23.4	88.3±9.9
	4	1.80±0.8	57.2±25.2	88.3±8.6
	5	1.77±0.8	57.6±25.4	87.2±8.6
	6	1.73±0.8	55.2±23.9	89.4±8.7
	7	1.43±0.9	45.9±27.1	91.4±15.6
2008	TP	2.31±0.5*	73.0±15.9*	84.4±8.6
	1	1.61±0.6	46.0±16.7	82.6±8.4
	2	1.56±0.8	49.1±25.8	84.0±11.0
	3	1.56±0.7	50.4±24.3	84.8±10.4
	4	1.45±0.6	48.0±20.1	84.8±9.3
	5	1.50±0.8	47.1±25.4	87.9±11.0
	6	1.30±0.6	42.2±20.5	90.9±7.9
	7	0.7	24.0	87.7
2009	TP	2.5±0.5*	78.7±15.5*	92.1±4.5
	1	1.1±0.8	37.5±27.7	92.7±2.5
	2	1.3±0.6	40.7±16.8	92.2±5.7
	3	1.6±0.7	51.0±21.0	92.6±5.4
	4	1.6±0.5	50.9±18.3	93.3±5.1
	5	1.1±0.4	37.2±12.7	92.3±2.8

Unidades y acrónimos: TP (tallo principal); peso panícula (g); NGP(núm. granosxpanícula<sup>-1</sup>); FertP(fertilidad en panícula.\* Diferencias significativas dentro del mismo año (LSD, p<0.05).

Se detectaron diferencias significativas en la producción y tamaño de las panículas entre el tallo principal (TP) y los primarios, coincidiendo con resultados en arroz de otros autores sobre las diferencias en el rendimiento entre tallos primarios y tallo principal (Counce, *et al.*, 1996; Wu, *et al.*, 1998, Pham Quang, *et al.*, 2004b; Yan, *et al.*, Yan, *et al.*, 2009). La producción de los tallos principales fue superior a los 2 g x panícula<sup>-1</sup>, con valores medios comprendidos entre los 2.29 i 2.5 g, mientras que los pesos de las panículas primarias estuvieron comprendidos entre 0.7 y 1.82 g. El tamaño de panícula en el tallo principal fue superior a los 73 granos x panícula<sup>-1</sup>, mientras que la media de los primarios en los tres años fue de 49 granos, con un rango comprendido entre los 24 y 57.6. En el caso de la fertilidad de las panículas, no se obtuvo respuesta ni de la categoría ni del orden de los tallos (Wu, *et al.*, 1998). Entre las posiciones, los resultados estadísticos no detectaron diferencias significativas. Por lo tanto, el rendimiento y el tamaño de la panícula son función de la categoría (tallo principal vs tallos primarios) de los tallos si bien las últimas posiciones presentaron un descenso notable de los valores medios de peso y tamaño de las panículas.

Cuando se realizó la comparación interanual de las posiciones de las panículas primarias, se observó que el comportamiento en 2007 y 2008 fue muy similar (Fig. 42A) con producciones muy similares en las 5 primeras posiciones (1.79 y 1.50 g x panícula<sup>-1</sup>, en 2007 y 2008, respectivamente) seguidas de un descenso progresivo a partir de P6 (panícula 6). En cambio, en 2009 las posiciones más productivas se concentraron en P3 y P4, con 1.6 g x panícula<sup>-1</sup>, comparados con la media de 1.2 g x panícula<sup>-1</sup> del resto aunque también se observó un descenso de la medias en la última posición. La misma pauta se observó en el tamaño de la panícula (Fig. 42B). Counce (1996) y Mohapatra y Kariali (2008)

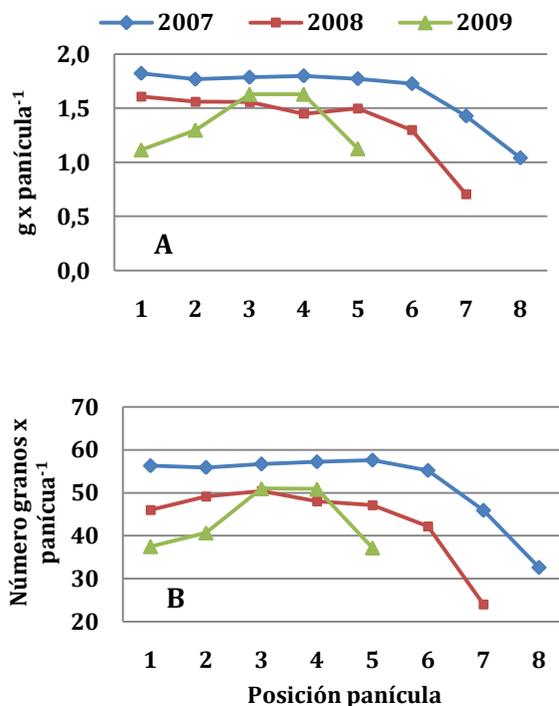
encontraron una relación negativa entre el rendimiento de la panícula y el orden de emergencia. Nuestros resultados no mostraron esta relación ni en el rendimiento ni en el tamaño de la panícula aunque sí se detectó una leve respuesta al tiempo de emergencia en las últimas posiciones si bien no fue significativa. El diferente patrón observado en los dos estudios puede estar motivado por las diferencias en la capacidad de ahijamiento que es notablemente superior en estos estudios que en el que aquí se expone. Las plantas del estudio de Counce se pudieron evaluar hasta 18 panículas correspondientes a categorías y posiciones diferentes (incluyendo tallos primarios, secundarios y el tallo principal) y alrededor de 12 en el de Mohapatra y Kariyal; en el de la presente tesis doctoral sólo se obtuvieron un máximo de 7 órdenes diferentes de tallos primarios más el tallo principal. Una mayor capacidad de ahijado podría intensificar la competencia entre los tallos, acentuándose de esta manera la superioridad aportada por disponer de más tiempo para el desarrollo vegetativo y reproductivo.

A partir del comportamiento observado, se puede concluir que el orden de los tallos, luego el tiempo de emergencia, no ejerció influencia sobre el rendimiento y tamaño de las panículas en 2007 y 2008, exceptuando las últimas posiciones. No obstante, en 2009, sí hubo efecto de la posición de los tallos, pero no como respuesta al tiempo de emergencia sino que a favor del tercer y cuarto nudos. Esta diferenciación del peso de las panículas en P3 y P4 podría venir explicado por procesos de traslocación de asimilados procedentes de los tallos senescentes. Cuando la mortalidad sucede en tallos con un buen grado de desarrollo, aumenta de probabilidad de este tipo de traslocación (Simons, 1982, citado en Berry, *et al.*, 2003). San-oh, *et al.* (2004) también concluyeron que el carbono fijado en los tallos no-productivos al principio del estadio

vegetativo podría contribuir a la acumulación de materia seca y al rendimiento. En trigo, Sheehy, *et al.* (2001) observaron que, cuando los tallos que morían eran de emergencia más tardía, representaban una mayor pérdida global de materia seca. Estos asimilados hubieran sido captados preferentemente por P3 y P4. Thorne y Wood (1987) observaron que un 70% de los fotoasimilados fijados por los tallos no-supervivientes se exportaron a otras partes de la planta durante su senescencia. Sin embargo, también es cierto que la exportación se dirige de forma preferente al TP por su mayor capacidad sumidero (Lauer y Simmons, 1988). Otra posible explicación de la superioridad de estas posiciones puede recaer en la mejor capacidad de síntesis y acumulación de asimilados originada por un mayor índice de área foliar de los tallos y/o una mayor tasa de crecimiento. Este razonamiento vendría avalado por los resultados descritos por Kariali, *et al.* (2008) y Mohapatra y Kariali (2008) donde la concentración de asimilados durante la antesis y la de almidón a la madurez de los tallos era superior en los tallos prematuros, indicando la dominancia metabólica de estos sobre los más tardíos.

El tiempo como factor limitante sólo se manifestó en las últimas posiciones. Lauer y Simmons (1985) atribuyeron la inferioridad de estas posiciones a la exportación de los fotosintatos del TP hacia los entrenudos en detrimento de los tallos al inicio de la elongación, agravando la capacidad competitiva de estas posiciones ya de por sí pobre por la falta de tiempo. Wu, *et al.* (1998) atribuyeron los menores rendimientos de los tallos tardíos a una menor habilidad en la obtención de metabolitos.

Asimismo, para estas mismas variables se advirtió que cuando mayor era el rango de posiciones productivas obtenido, mayor era el rango de producción indicando el efecto de compartimentación de los asimilados.



**Fig. 42** Distribución de la producción (A) y el tamaño de la panícula (B) entre panículas primarias según su posición.

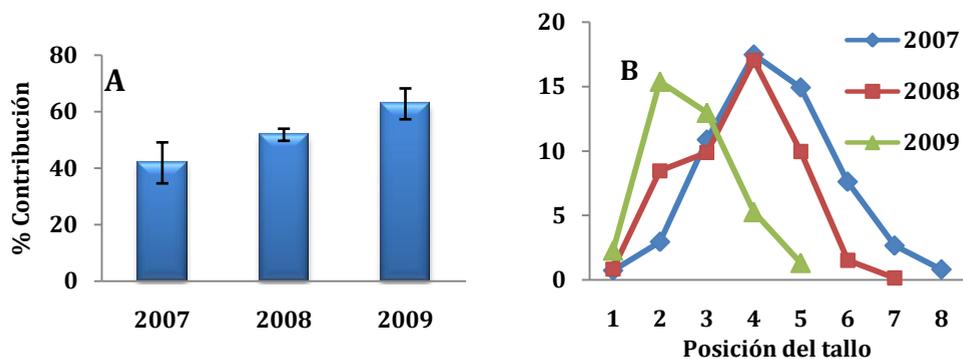
### 3.2.5.3 Contribución al rendimiento en planta de las panículas según el orden

La contribución de una panícula al rendimiento de la planta es el porcentaje de su rendimiento respecto al total. Mientras que en muchos cereales, el rendimiento de los tallos no tienen repercusiones en la producción de la planta, excepto para densidades de planta muy bajas (Simons, 1982, citado en Berry, et

al., 2003), en arroz los tallos representan una elevada proporción del rendimiento de la planta (Counce, 1992). La contribución de las panículas se calculó a través del producto del rendimiento de la panícula y la tasa de supervivencia para cada posición; por tanto, es un concepto que incluye la frecuencia de desarrollo de la yema, la posterior supervivencia del tallo y el rendimiento. A continuación, se presenta las medias anuales de contribución según la posición obtenidas a partir de los resultados del experimento 2.

**Tabla 31 Contribución de las panículas (%) al rendimiento de la planta según su posición en los años 2007, 2008 y 2009.**

Posición panícula	2007	2008	2009
M	41.9±7.3	51.8±2.1	62.8±5.5
1	0.7±0.4	0.8±0.3	2.3±1.9
2	3.0±1.1	8.4±1.2	15.4±6.4
3	10.9±0.5	9.9±1.4	13.0±4.2
4	17.5±2.8	17.0±0.7	5.3±2.6
5	14.9±4.1	10.0±1.6	1.3±0.7
6	7.6±1.8	1.5±0.7	
7	2.7±2.1	0.1±0.2	
8	0.8±0.4		



**Fig. 43 Contribución del tallo principal (A) y de las panículas (B) al rendimiento de la planta según su posición en los años 2007, 2008 y 2009.**

En los tres años de ensayo, la principal contribución al rendimiento de la planta la tuvo el tallo principal (TP) con porcentajes entre el 42 y 63% (Tabla 31, Fig 43A). Cuando empieza la elongación del tallo principal, aumenta la distribución de los asimilados hacia éste en detrimento de los primarios, conllevando los procesos de senescencia (Lauer y Simmons, 1985) y de preponderancia del TP (Lauer y Simmons, 1988). Consecuentemente, el tallo principal aumenta su potencial productivo dentro de la planta. Este porcentaje decreció con el número de panículas en planta, de manera que en 2009 la participación del tallo principal fue del 63% con dos panículas por planta, mientras que en 2007, con tres panículas, fue del 42%. La mortalidad global de los tallos en la planta fue superior en 2009 que en 2007 y 2008, acentuando de esta manera la dominancia del TP respecto los primarios por la direccionalidad de los asimilados. Estos resultados contrastan en gran medida con los aportados por Mohapatra y Kariali (2008) donde la contribución del tallo principal no superó el 10% en ninguno de los dos estudios. En estos dos estudios se utilizaron

variedades tipo indica con alta capacidad ahijadora y con un mayor número final de panículas respecto las variedades japónica. La mayor presencia de tallos obliga a una mayor compartimentación de los asimilados repercutiendo en la importancia relativa del tallo principal en el rendimiento de la planta.

La distribución de la aportación entre panículas primarias fue también diferente en 2009 respecto 2007 y 2008. En 2009, fueron las panículas del segundo y tercer nudo las que más aportaron al rendimiento de la planta, con un 15 y 13%, respectivamente. En 2007 y 2008, la principal contribución tuvo lugar entre la tercera y quinta posición, con porcentajes entre el 10 y 17%. Dicho de otra forma, los dos primeros años necesitaron el TP y las 5 primeras panículas para acumular el 90% del rendimiento de la planta mientras que en 2009, en P3 ya se había alcanzado el 93%. Por tanto, 2009 presentó las principales contribuciones en menos posiciones y más tempranas.

Se relacionaron estos resultados con los de los apartados anteriores respecto las frecuencias de desarrollo de las yemas, productividad (FPN, TST) y rendimiento de las panículas. En referencia a la frecuencia de desarrollo de las yemas (FDY) y productividad de las posiciones, en 2007 y 2008 se observó que las posiciones con mayor contribución (P4 y P5) también eran las que mostraban mayores porcentajes de aparición (85 y 91% en 2007 y 2008, respectivamente) y supervivencia (52 y 40% en 2007 y 2008, respectivamente). Contrariamente, en 2009 no todas las posiciones con altas FDY coincidieron con altas tasas de supervivencia y contribución. Las yemas 4 y 5 crecieron en un 89 y 76% de los nudos pero sólo mostraron una supervivencia del 13 y 12% y aportaciones del 5 y 1%, respectivamente. Las posiciones 2 y 3 sí fueron coincidentes en sus elevadas frecuencias de

desarrollo, supervivencia y contribución. En común mostraron los tres años las bajas aportaciones de P1 que en ningún caso alcanzó el 5%. Las panículas de los últimos nudos también tuvieron papeles poco relevantes en el rendimiento de la planta. Estos resultados indican que la contribución de las panículas depende del porcentaje de desarrollo de las yemas y de la posterior supervivencia pero que mayores probabilidades de desarrollo de las yemas no siempre implican mayores contribuciones.

En cuanto a la relación de la contribución con los rendimientos de las panículas, se observó en 2007 y 2008 que, aunque las panículas entre P2 y P5 mostraron los mismos rendimientos, el rango de contribución de estas posiciones fue muy amplio (del 3 al 17% en 2007 y del 8 al 17% en 2008). Por otro lado, en 2009 el rendimiento de P4 fue superior a P2 aunque la aportación del último fue superior. Con todo ello, se concluyó que el porcentaje de contribución no es función del rendimiento de la panícula.

En 2007 y 2008, las primeras posiciones sufrieron un ahijamiento pobre, con bajas emergencias. En 2009, el establecimiento de las plántulas tuvo lugar de forma más rápida lo que indica una mejor condición del cultivo y mayor capacidad para sustentar un desarrollo óptimo de las yemas. En estas circunstancias, las primeras hojas pudieron proporcionar los asimilados de forma adecuada a los tallos permitiendo su emergencia y posterior desarrollo. El crecimiento de las posiciones más bajas durante este año impidió la supervivencia de las posteriores, explicando de esta manera la mayor frecuencia productiva en nudos más bajos respecto los años anteriores. Elevados porcentajes de emergencia en mayor número de nudos y en posiciones más bajas fue significativo de un buen establecimiento y desarrollo

vegetativo de la planta y estuvo relacionado con el rendimiento posterior del cultivo, tal y como se verá en la próxima sección. Por consiguiente, se concluye que la contribución de un tallo específico al rendimiento de la planta depende en gran medida de las condiciones de cultivo en el momento de su emergencia. Estos resultados concuerdan con los aportados por Lafarge, *et al.* (2002) quienes llegaron a la misma conclusión para el cultivo de sorgo, y añadieron que esta influencia del estado del tallo durante su crecimiento era a través del desarrollo foliar del tallo. Asimismo, la comparación de los tres años demuestra la conveniencia de un ahijamiento precoz y su repercusión en el rendimiento del cultivo.

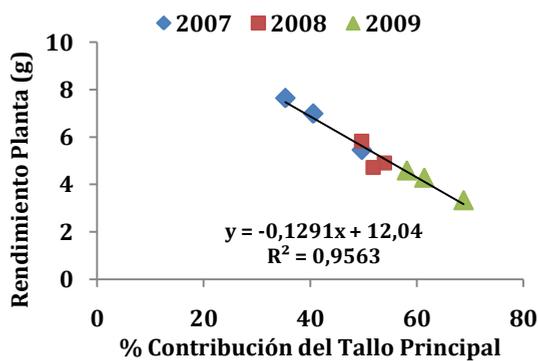
Volvemos a comparar el comportamiento con los observados en los estudios previamente citados: Mohapatra y Kariali (2008) y Gendua, *et al.* (2007). En ellos, se describía una disminución del rendimiento y la contribución de los tallos con la categoría y el tiempo de emergencia. Por lo tanto, también en este punto difieren respecto los resultados aquí presentados, cuya contribución de las panículas respondía, en gran medida, a la frecuencia de desarrollo de los tallos. Por lo tanto, la distribución de las aportaciones de las panículas viene determinada por las fases en las que se produce una mayor diferenciación de comportamientos. En las condiciones consideradas en la presente Tesis, la mayor diferenciación tiene lugar durante la emergencia de los tallos mientras que el rendimiento de las panículas primarias es bastante uniforme, por lo que las principales aportaciones estarán determinadas por las condiciones de desarrollo de los tallos. En variedades con elevada capacidad ahijadora, existe una relación negativa entre momento de emergencia de la panícula y su rendimiento, dibujando de esta manera el patrón de distribución de los rendimientos dentro de una misma planta. Esta comparación sugiere que en las

condiciones del Delta del Ebro, esto es, siembra directa y variedades japónica, el establecimiento de la plántula y el ahijado representan fases críticas para el cultivo del arroz; en cambio, en arroz trasplantado y variedades índica, las fases con mayor repercusión en el cultivo serían la reproductiva y la maduración. Esta deducción está en sintonía por lo descrito por Ntanos y Koutroubas (2002) quienes concluyeron que es muy importante el almacenaje de asimilados en el cultivo del arroz antes de la floración en condiciones mediterráneas, tanto en variedades Japónica como Indica, puesto que la contribución osciló entre el 9 y 42%.

Asimismo, la síntesis del comportamiento observado en estos tres años es que en condiciones de establecimiento precoz del cultivo, la distribución del rendimiento de la planta estuvo determinada por la supervivencia que definió los nudos primarios preponderantes. En este caso, la senescencia se relacionó con el tiempo de emergencia a partir del segundo nudo. En cambio, en condiciones de retraso del establecimiento del cultivo el principal factor limitante fue primeramente la frecuencia de desarrollo de las yemas que posteriormente definió la supervivencia de los tallos. El rendimiento y los componentes del rendimiento en las panículas no fueron factores claves para la contribución excepto en el caso de la comparación del tallo principal respecto los primarios.

Una vez se conocía cómo se repartía la producción de la planta en las diferentes posiciones, se procedió al análisis de la repercusión de esta distribución en el rendimiento. Para ello, se estudió la relación entre la contribución del tallo principal y el rendimiento, con el resultado de una regresión lineal negativa ( $N=9$ ,  $p<0.01$ ) con elevados niveles de ajuste ( $R^2=0.96$ ) (Fig. 44). El gráfico

también muestra como esta linealidad se mantenía dentro de cada año. Por consiguiente, cuanto más producción se acumulaba en el tallo principal, menor era el rendimiento de la planta. Es importante recordar, para la correcta interpretación de este resultado, que dentro de cada año las densidades de planta y de panícula fueron las mismas, por lo que no hubo influencia de estos dos factores en los resultados. Descartar el efecto de la densidad de planta y, por tanto, del número de panículas y analizar los resultados dentro de cada año, permitió averiguar cuál es la situación más interesante para mejorar el rendimiento del cultivo: promover la aportación del tallo principal o bien conseguir una distribución más equitativa entre las panículas. Efectivamente, los resultados señalaron que, dentro de un mismo año y para la misma densidad de planta, la opción más productiva fue la que permitió un mayor repartimiento del rendimiento entre las panículas.



**Fig. 44 Regresión entre la contribución del tallo principal y el rendimiento de la planta a partir de los datos de 2007 hasta 2009.** Regresión lineal significativa (N=9, p<0.01).

El porcentaje de contribución del tallo principal al rendimiento está influenciado por el número de panículas por planta, de manera que cuantas

más panículas mayor compartimentación de los asimilados y, consecuentemente, menor aportación del tallo principal. Este razonamiento explica la colocación de los valores de cada año a lo largo de la recta, donde 2007 se situó en la parte más alta de la recta debido al mayor número de panículas por planta ( $3.2 \pm 1.1$  panículas x planta<sup>-1</sup>). El efecto de la densidad de panícula sobre la contribución de los tallos al rendimiento se aborda en el apartado 3.2.3.4 de la presente sección.

### 3.2.5.4 Factores que afectan al rendimiento de la planta y la productividad de los tallos

#### 3.2.5.4.a Variedades

Se presentan los resultados obtenidos sobre la influencia varietal en la contribución al rendimiento según la posición de las panículas (Tabla 32). Los valores corresponden a las medias anuales obtenidas por cada posición en las variedades Gleva y Tebre en la dosis correspondiente a 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup> y en los años 2007 y 2008. No se detectó interacción significativa con la densidad de planta, por lo que para el análisis del rendimiento se optó por utilizar los datos derivados de una única dosis de siembra.

**Tabla 32 Rendimiento y sus componentes en las plantas (2007-2008).**

Año	Variedad	DPL	RendPI	NPPI	NGP	PMG	FertPI
2007	Gleva	1407±99	66±22	30±09	75.7±25.6	34.8±2.0	82.4±8.9
	Tebre	1213±300	11.1±1.6	3.9±0.7	91.8±28.1	34.6±6.8	94.6±5.1
2008	Gleva	194	4.9±0.2	2.0±0.5	64.8±24.6	35.2±2.0	85.6±7.9
	Tebre	194	5.1±1.3	1.8±1.0	107.8±29.4	33.9±2.7	73.8±16.1

Unidades y acrónimos: DPL(densidad de planta, # x m<sup>2</sup>); RendPl (rendimiento en planta, g); NPPI: (núm. panículas por planta); NGP (núm. granos por panícula); PMG (peso mil granos); FertPl (fertilidad en planta, %). Media ± desviación estándar.

**Tabla 33 Contribución a la producción de la planta de las panículas según su posición en las variedades Gleva y Tebre durante los años 2007 y 2008.**

Var	Cat/Pos Pan	2007	2008	Var	Cat/Pos Pan	2007	2008
<b>G</b>	<b>TP</b>	43.2±9.6a	56.5±22.3a	<b>T</b>	<b>TP</b>	43.3±15.2a	57.5±16.8
	<b>1</b>	2.3±2.8d	3.2±1.2e		<b>1</b>	0.9±1.1d	3.9±1.6
	<b>2</b>	7.0±4.3d	7.7±1.8d		<b>2</b>	4.0±2.2d	11.0±3.1
	<b>3</b>	17.7±2.3b	9.8±2.5 cd		<b>3</b>	12.8±5.6b	9.3±3.2
	<b>4</b>	17.2±6.0b	12.6±10.1b		<b>4</b>	21.9±3.8b	12.4±6.6
	<b>5</b>	9.0±6.0c	9.3±9.1b		<b>5</b>	10.8±5.0c	4.8±3.9
	<b>6</b>	3.2±2.5d	0.8±1.0b		<b>6</b>	4.5±4.4d	1.1±1.5
	<b>7</b>	0.4±0.6d			<b>7</b>	1.5±1.8d	
				<b>8</b>	0.3±0.7 d		

Unidades y acrónimos: Var (variedad); G (Gleva); T (Tebre); Pos/Cat Pan (posición/ categoría de panícula); TP (Tallo principal). Media ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de la misma categoría indican diferencias significativas.

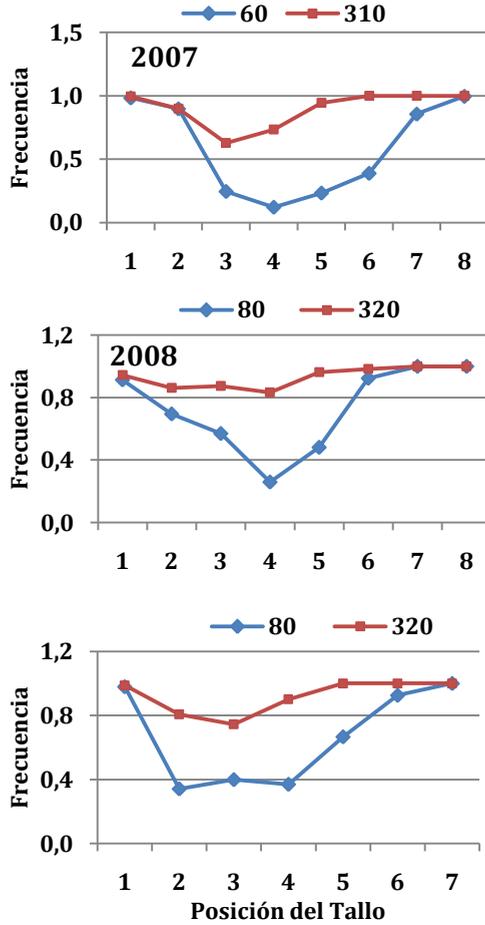
No se observó influencia varietal en la distribución de la aportación de cada nudo al rendimiento de la planta.

Las contribución del tallo principal fue prácticamente la misma en ambas variedades dentro de cada año, siendo del 43% en 2007 y del 57% en 2008. Entre los tallos primarios, en 2007 Gleva obtuvo las principales aportaciones en dos posiciones centrales P3 y P4 representando un 34% del total de la planta, mientras que Tebre las repartió en tres, con una contribución total del 45%, superando la aportación del tallo principal. En 2008, las posiciones más relevantes fueron desde la P3 hasta la P5 en Gleva, acumulando un 31.7%, mientras que en Tebre de P2 hasta P4, sumando un 32.7%. La aportación de la última posición en las dos variedades y en los dos años fue prácticamente nula.

### ***3.2.5.4.b Densidad de planta***

#### *b.1 Tasa de supervivencia o productividad de las panículas*

La figura 45 muestra las tasas de mortalidad en cada posición de tallo en las dosis de siembra máxima y mínima utilizadas en los tres años de experimentación (Experimento 1). Se observó como la mortalidad aumentaba en las posiciones tardías hasta alcanzar incluso valores cercanos al 100% en las mayores dosis de siembra. Por tanto, la densidad de planta influye también en la mortalidad de los tallos, aumentando su porcentaje en las poblaciones densas (Wu, *et al.*, 1998). Además, todas las posiciones excepto T3 en 2007 mostraron porcentajes superiores al 70% en la máxima dosis de siembra, constatando de esta manera los efectos de competitividad por los recursos anteriormente descritos.



**Fig. 45 Tasa de mortalidad en las dosis de siembra mínimas y máximas de cada año (2007-2009) para cada posición.** Los números de las leyendas indican las dosis de siembra en kg semilla x ha<sup>-1</sup>.

*b.2 Rendimiento y componentes del rendimiento en planta*

Seguidamente, se presentan los resultados del rendimiento y componentes del rendimiento obtenidos a partir de las valoraciones realizadas en las plantas marcadas situadas en los marcos de monitorización (Tabla 34). En los años 2007 y 2008, los valores corresponden a la media de las dos variedades ya que

el efecto de la variedad así como su interacción con las dosis de siembra resultaron no significativos.

**Tabla 34 Influencia de la densidad de planta en el rendimiento y sus componentes en planta en los años 2007 hasta 2009.**

Año	DS	DPL	RendPl	NPPI	RendP	NGP	PMG	FertPl
2007	60	53	13.7±0.6a	4.8±0.3a	2.9±0.1	95.5±10.2	33.6±1.9	90.3±0.5
	160	129	9.0±1.5b	3.5±0.7b	2.6±0.1	85.0±4.2	34.1±0.4	89.8±1.7
	210	166	8.3±2.3b	3.3±0.6c	2.5±0.2	83.3±12.4	34.6±0.0	88.3±5.1
	310	249	4.7±2.2c	2.1±0.8d	2.2±0.1	74.4±4.4	34.3±0.4	88.1±4.9
2008	80	150	7.6±0.4	3.5±0.4	2.4±0.8	85.1±31.4	34.5±2.3	79.0±4.8
	160	194	5.4±0.9	2.8±0.9	2.2±0.8	87.6±34.7	34.6±2.4	74.4±1.7
	240	256	4.1±1.9	1.8±1.9	2.3±1.0	83.1±33.9	35.0±3.9	77.5±2.6
	320	333	3.5±1.2	1.7±1.2	2.1±0.3	81.2±31.5	33.6±2.5	75.6±6.1
2009	80	111	9.4±0.6	3.6±0.2	2.5±0.7	78.9±20.3	33.8±2.9	91.8±2.1
	160	222	5.8±0.7	2.6±0.2	2.1±0.8	64.8±26.2	35.6±4.2	91.1±2.8
	240	333	3.7±0.7	1.8±0.3	2.0±0.7	61.7±21.8	34.6±2.3	93.6±1.9
	320	444	2.9±0.2	1.5±0.1	1.9±0.7	58.8±21.8	35.8±2.2	90.4±2.6

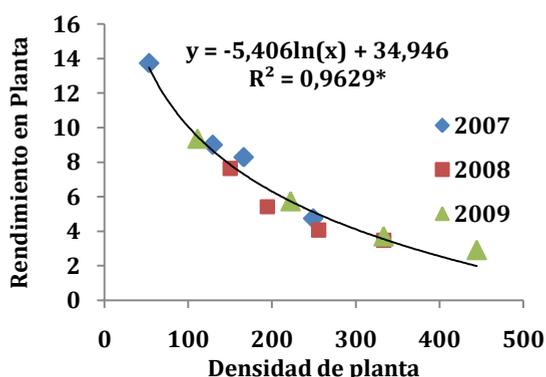
Unidades y acrónimos: DS (Dosis de siembra, kg semilla x ha<sup>-1</sup>); DPL (densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); RendPl (rendimiento en planta, g); NPPl: (número panículas por planta); RendP (rendimiento en panícula, g); NGP(número granos por panícula); FertPl (fertilidad en panícula, %). Media±desviación estándar.

El rendimiento en planta estuvo comprendido entre los 2.9 y los 13.7 g x planta<sup>-1</sup>. El número de panículas por planta era menor cuando mayor era la densidad de planta y por consiguiente, el valor más bajo (1.5 panículas x planta<sup>-1</sup>) se registró en el marco con el mayor número de plantas (444 plantas x m<sup>-2</sup>) mientras que el máximo (4.8 panículas x m<sup>-2</sup>) donde la densidad fue menor (53 plantas x m<sup>-2</sup>). La disminución significativa del rendimiento en planta con la DPL sugiere que a pesar de una posible traslocación de los asimilados procedentes de los tallos senescentes a los supervivientes, el balance neto es negativo y existe, consecuentemente, una pérdida de los asimilados previamente fijados. Se refuerza esta idea con las conclusiones aportadas por Berry, *et al.* (2003) quienes cuantificaron la contribución de las pérdidas de materia seca de los tallos no-supervivientes en trigo. En su estudio, concluyeron que aunque la cantidad de de materia seca perdida era variable según el número de tallos muertos y su grado de desarrollo, el balance era siempre negativo, por lo que la senescencia de tallos suponía una reducción del potencial productivo del cultivo por la competencia con los supervivientes.

El peso medio de las panículas (valores entre 1.9 hasta 2.9 g x panícula<sup>-1</sup>) y su tamaño (valores entre 61.7 hasta 95.5 granos x panícula<sup>-1</sup>) disminuyeron con la dosis de siembra. El menor número de granos por panícula en 2009 se debe a que los valores corresponden únicamente a la variedad Gleva, mientras que los valores de 2007 y 2008 corresponden al promedio de las dos variedades, Gleva y Tebre.

El llenado de los granos y el peso de mil granos (PMG) no respondieron a la densidad de planta y no se observaron diferencias entre los tratamientos. La estabilidad de valores encontrada en estos dos parámetros ha sido previamente descrita por otros autores como Yoshida (1981) y Wu, *et al.* (1998), en PMG y fertilidad, respectivamente. Sin embargo, los valores de fertilidad 2008 se mostraron sensiblemente inferiores con una media de las cuatro densidades de planta de 77% comparada con los 89 y 92 % encontrados en 2007 y 2009, respectivamente.

La relación entre rendimiento de la planta y la densidad de planta se describió a través de una función logarítmica (Fig. 46) con un coeficiente de determinación de 0.96 ( $p < 0.001$ ,  $N = 12$ ).



**Fig. 46 Relación entre densidad de planta y rendimiento en planta (g x planta<sup>-1</sup>) en los años 2007 hasta 2009.** Regresión derivada de los valores medios de los tres años ( $N = 12$ ,  $p < 0.001$ ).

El elevado grado de ajuste a la función permite una buena estimación del rendimiento a partir de la densidad de planta a través de la ecuación 6:

$$\text{RendPl} = -5.4 \ln(\text{DPL}) + 34.95 \quad (\text{Ec.6})$$

En densidades altas, el rendimiento se asintotizó cerca de los 2 g x planta<sup>-1</sup>, valor que se acerca al peso de la panícula del tallo principal, indicando la aproximación a un sistema de cultivo de plantas “mono-tallo”.

Se compararon también las funciones logarítmicas de cada año por separado (Tabla 35). 2009 presentó el menor valor del coeficiente del logaritmo en valores absolutos (4.76) respecto los años previos (5.6 y 5.2, en 2007 y 2008, respectivamente). Esta condición le otorga a la función del 2009 una pauta de decrecimiento del rendimiento más lenta con la densidad de planta, lo que implica que en igualdad de densidad de planta, el rendimiento en 2009 fue superior que en los otros años. Esta diferenciación se explica por las mejores condiciones de cultivo que, tal y como se describe en el siguiente apartado, a su vez está relacionado con la distribución del rendimiento de la planta en las panículas.

**Tabla 35 Relación entre la densidad de planta (DPL) y el rendimiento de la planta (RendPl) en los tres años (2007-2009).**

Año	Ecuación	R <sup>2</sup>
2007	$RendPl = -5.6 \ln(DPL) + 36.1$	0.978
2008	$RendPl = -5.2 \ln(DPL) + 33.2$	0.932
2009	$RendPl = -4.8 \ln(DPL) + 31.7$	0.991

### *b.3 Contribución al rendimiento en planta de las panículas según el orden*

Se presentan los resultados sobre la influencia de la densidad de planta en la contribución al rendimiento según la posición de las panículas (Tabla 36).

**Tabla 36 Porcentaje de la contribución (%) según nivel jerárquico al rendimiento de la planta en diferentes dosis de siembra (2007- 2009).**

PosPan	Dosis de siembra			
	Densidad de planta			
2007	60	160	210	310
	53	129	166	249
TP	28.0±8.2a	39.2±13.3a	40.9±12.5a	60.6±19.4a
1	3.2±4.8c	1.4±2.8c	1.0±2.5c	1.1±2.7b
2	7.6±5.7bc	6.3±4.4bcd	5.5±4.6bc	5.5±7.7b
3	16.3±4.2 ab	16.7±4.8bc	16.8±3.4bc	15.0±13.5b
4	18.9±6.6ab	20.8±11.1b	20.7±7.5ab	14.8±9.1b
5	14.3±5.3ab	12.1±7.5bd	10.6±7.3bc	3.1±5.0b
6	9.1±6.3ab	2.7±3.1d	3.9±4.3c	
7	2.4±3.7c	0.9±2.1d	0.6±1.5c	
2008	80	160	240	320
	157	241	344	480
TP	34.0±5.4a	48.0±2.2a	71.8±2.3a	74.2±7.1a
1	3.9±0.0b	3.7±0.5b	2.8±0.8b	3.7±3.2b
2	11.8±5.1b	9.8±0.8b	8.4±0.1b	7.4±3.3b
3	12.0±2.0ab	10.0±0.0b	9.0±4.5b	7.2±1.3b
4	21.4±2.7ab	17.9±1.7b	5.4±1.6b	5.4±2.2b
5	14.1±10.4ab	9.9±1.6b	2.5±1.4b	1.5±2.1b
6	2.7±0.6b	0.7±1.0b	0.0	0.6±0.8b
7	0.1±0.1b	0.0	0.0	0.0

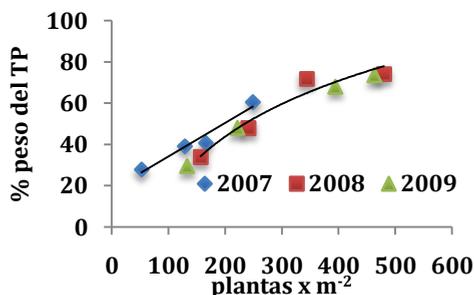
PosPan	Dosis de siembra Densidad de planta			
	80 133	160 222	240 394	320 463
TP	29.6±3.0a	48.2±8.4a	68.0±13.3a	73.6±8.0a
1	5.3±5.2abc	2.7±4.6b	3.4±5.9b	0.0±0.0
2	19.8±1.3abc	25.6±2.3a	13.5±11.8b	13.8±2.7b
3	21.1±1.8a	12.8±13.9ab	11.8±5.1b	11.5±8.9b
4	16.8±3.0abc	2.9±2.6b	3.3±2.9b	1.1±1.9b
5	6.4±4.3bc	2.4±4.2b	0.0	0.0
6	1.0±1.8c	5.5±9.5b	0.0	0.0

Unidades y acrónimos: PosPan (Posición panícula); TP (Tallo primario); Dosis de siembra (kg semilla x ha<sup>-1</sup>); Densidad de planta (plantas x m<sup>-2</sup>) Letras diferentes dentro de la misma densidad y año significan diferencias significativas (LSD, p<0.05).

El tallo principal es la posición que presentó mayor respuesta a las densidades de planta en la contribución, con diferencias en los porcentajes entre los 33 y 44 puntos entre la mayor y menor densidad de planta. A partir de 240 plantas x m<sup>-2</sup>, las diferencias entre el tallo principal y los primarios fueron significativas. En cuanto a los tallos primarios, la respuesta mostró leves variaciones en los diferentes años. En 2007, sólo P5 mostró diferencias notables entre los diferentes tratamientos, con el valor máximo de 14% en 53 plantas x m<sup>-2</sup> y el mínimo de 3.1% en 249 plantas x m<sup>-2</sup>. En 2008 y 2009, el número de posiciones afectadas por la densidad de planta aumentó hasta dos en 2008 (P4 y P5) y tres en 2009 (P2, P3 y P4) con diferencias máximas de 16 puntos en la misma posición. Estos resultados concuerdan tanto en su tendencia como en los valores medios con los obtenidos por Wu, *et al.* (1998) quienes obtuvieron porcentajes de contribución del tallo principal del 21, 29 y 39% para densidades de 56, 112 y 169 plantas x m<sup>-2</sup>. En sorgo, Lafarge, *et al.* (2002)

también describieron el mismo comportamiento en la contribución del tallo principal con la densidad de planta, aunque los porcentajes alcanzaron valores del 95% para densidades de 16 plantas x m<sup>-2</sup>. La comparación de valores entre los dos cultivos, sugiere la baja probabilidad de supervivencia de plantas mono-tallo en el cultivo del arroz, puesto que los valores medios de la aportación del tallo principal fueron inferiores al 80%. Por consiguiente, sería altamente probable la mortalidad de plantas en campos con elevada densidad de planta.

En 2008 y 2009, la relación entre la aportación del peso del tallo principal a la producción y la densidad de planta se describía a través de una función logarítmica, tal y como se muestra en la figura 47 ( $R^2=0.94$  y  $0.98$  en 2008 y 2009, respectivamente). En 2007, con menor densidad de planta, la relación fue lineal ( $R^2= 0.96$ ). Por tanto, la importancia del TP en el rendimiento es función de la densidad de planta y su crecimiento se mostró lineal hasta que se asintotizó a partir de las 300 plantas x m<sup>-2</sup> con porcentajes máximos del 75%, momento a partir del cual el cultivo se convertiría en una población de plantas con dos tallos mientras que las mono-tallo morirían.



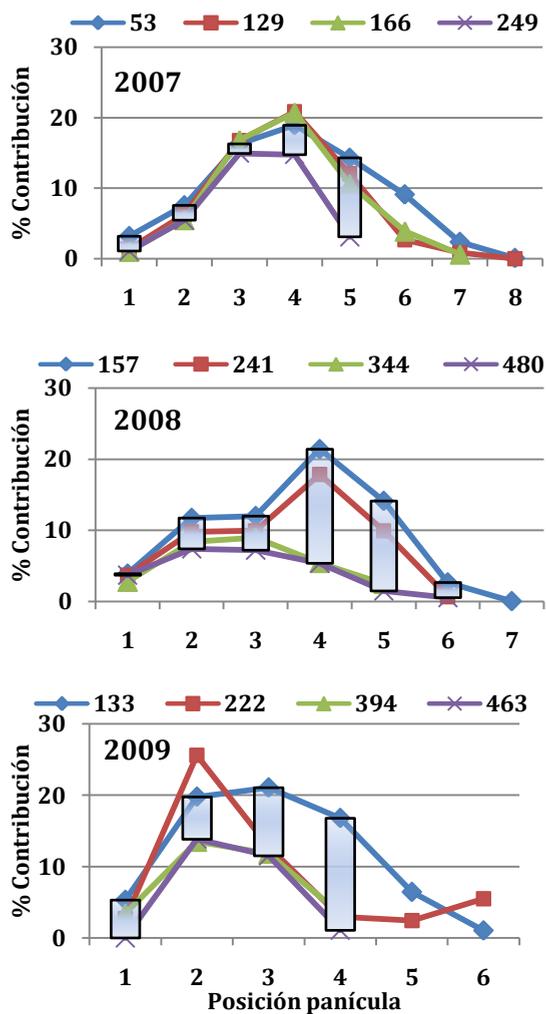
**Fig. 47 Relación entre la densidad de planta y la contribución (%) del peso del tallo principal (TP) a la producción de la planta**

En referencia a la contribución de las panículas primarias, la figura 48 muestra la distribución en los 3 años y el grado de respuesta observado en las

posiciones. En 2007 hubo pocas diferencias entre las diferentes densidades de planta, de manera que las principales contribuciones coincidieron todos los tratamientos en ser las de P3 y P4, con valores superiores al 15%. Entre 53 y 166 plantas x m<sup>-2</sup>, a partir de P4 la contribución disminuyó lentamente hasta P7 donde prácticamente fue nula. En cambio, en 249 plantas x m<sup>-2</sup>, la última panícula fue P5 y su porcentaje inferior al 5%. El bajo nivel de respuesta observado en la contribución a la densidad de planta se debe a la heterogeneidad de las parcelas y al menor rango de valores de densidad de planta.

En 2008 el porcentaje de la aportación aumentó en todas las posiciones al disminuir la densidad de planta. En las dos densidades más bajas, P4 y P5 presentaban valores superiores al 15 y 10%, respectivamente, mientras que no superó el 5% en las dos últimas densidades.

El comportamiento observado en 2009 a partir de 222 plantas x m<sup>-2</sup> fue muy parecido, donde P2 y P3 acumularon prácticamente la totalidad de la aportación de los tallos. En cambio, en 133 plantas x m<sup>-2</sup>, aportaciones superiores al 15% tuvieron lugar en las posiciones comprendidas entre P2 y P4. Este año se diferenció de los anteriores por presentar porcentajes más altos en las posiciones más bajas y porque fue el que mayores diferencias entre tratamientos dentro de cada posición registró.



**Fig. 48** Contribución de las panículas primarias al rendimiento de la planta (%) en diferentes densidades de planta en los años 2007 hasta 2009. Las barras representan la diferencia en los porcentajes de aportación en una misma posición. La leyenda indica densidades de planta (plantas x m<sup>-2</sup>).

Para concluir esta sección y a modo de resumen, se destaca que el comportamiento observado consistió en una mayor distribución de la contribución al rendimiento en más posiciones a medida que disminuía la

densidad de planta, dada la mayor tasa de productividad (explicada por la mayor frecuencia de desarrollo de las yemas y posterior supervivencia de los tallos) de las posiciones más tardías por los menores niveles de competencia por la captación y asimilación de recursos. El tallo principal es el que más recibió la influencia de la densidad de planta en la contribución al rendimiento de la planta. Estos resultados concuerdan con los presentados por Wu, *et al.* (1998), Kato y Katsura (2010) quienes atribuyeron la respuesta al aumento de la materia seca traslocada hacia el tallo principal con el aumento de la densidad de planta. El estado del cultivo condiciona la respuesta de la distribución del rendimiento entre las diferentes posiciones, viéndose acentuada en mejores condiciones de crecimiento. Además, las buenas condiciones de cultivo de 2009 que se mostraron por su vigor precoz repercutieron en una mayor acumulación la producción en las panículas de los nudos más bajos y, consecuentemente, en un mayor rendimiento final de la planta.

#### ***3.2.5.4.c Manejo de agua y fertilización nitrogenada***

Los datos aportados por el experimento 2 en cuanto al rendimiento en la planta y la contribución de las panículas a la producción final mostraron que no había interacción significativa entre los factores manejo de agua y fertilización nitrogenada. Por consiguiente, se decidió presentar los análisis de cada factor se forma separada. Sin embargo, tal y como se verá en el desarrollo de esta sección, para la interpretación de ciertos resultados fue necesario considerar la combinación de ambos tratamientos.

## c.1 Manejo de agua

### c.1.1 Rendimiento y componentes del rendimiento en planta

Se presentan los resultados obtenidos sobre la influencia del manejo de agua en el rendimiento de la planta y la contribución. Según los resultados estadísticos, el rendimiento y sus componentes en los órdenes de la panículas no mostraron respuesta a los manejos de agua por lo que sólo se exponen las medias correspondientes a la planta. (Tabla 37).

**Tabla 37 Influencia del manejo de agua en el rendimiento de la planta y sus componentes.**

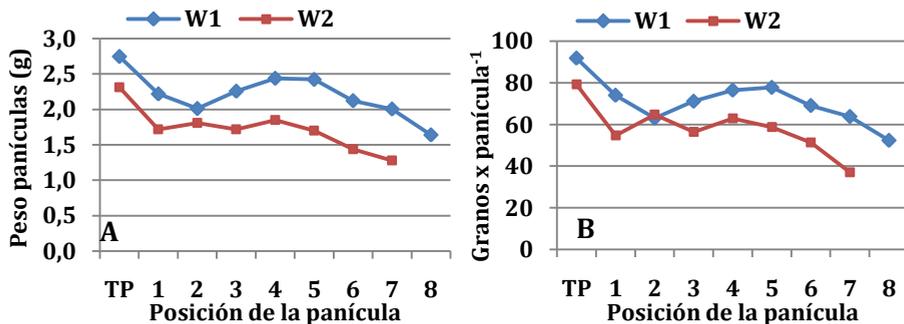
	2007		2008		2009	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2
DPL	124±64.2	130±61.6	222	222	250	250
RendPl	8.6±3.9	5,3±2.6	5.6±1.2	4.7±1.6	4.3±3.8	3.9±1.0
NPPI	3.7±1.1	2,8±0.9	2.6±0.8	2.5±0.7	2.2±0.4	2.1±0.5
RendP	2.5±0.8	2.0±0.7	2.1±0.8	2.0±0.8	2.0±0.8	1.9±0.8
NGP	71.5±17.5	61.2±15.6	76.4±26.7	77.0±64.2	63.2±6.59	58.9±4.9
FertPl	91.2±11.4	79.0±18.0	85.0±4.6	83.0±3.8	92.1±1.6	92.3±1.7

Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); RendPl (rendimiento en planta, g); NPPI (número panículas x planta<sup>-1</sup>); RendP (Rendimiento x panícula<sup>-1</sup>, g); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); FertPl (fertilidad media de las panículas,%); W1 (lámina continúa a 7 cm); W2( riego intermitente a 3 cm)..

Para el análisis de los presentes datos hay que considerar el efecto de la densidad de planta en el área donde crecieron las plantas evaluadas (marco de monitorización) para el seguimiento del ahijamiento. En 2007, se decidió aplicar la misma densidad que la evaluada en la resta de la subparcela en la que estaban ubicadas, dada la heterogeneidad obtenida en cuanto al establecimiento de las plántulas. En 2008 y 2009, se consiguió una mayor homogeneidad y, para evitar efectos de densidad que podrían enmascarar los

resultados, se optó por aplicar la misma densidad de planta en todos los marcos (basada en la media de las tres repeticiones). En la tabla se especifica la densidad de planta en el marco de monitorización.

En 2007, las plantas en lámina constante a 7 cm (W1) obtuvieron un mayor rendimiento que en riego intermitente a 3 cm (W2) tal y como indican los datos de rendimiento y sus componentes (Tabla 37) en los que los valores siempre fueron superiores en W1. Comparativamente, se observó una respuesta similar a la que hubiera tenido lugar en diferentes densidades de planta aunque los datos confirmaron que el número de plantas fue el mismo (124 y 130 plantas x m<sup>-2</sup> en W1 y W2, respectivamente). Además, si bien es cierto que no hubo interacción entre el manejo de agua y la posición de la panícula para el rendimiento, para el caso concreto de 2007 sí se observaron diferencias destacables en las posiciones de las panículas según el tratamiento de agua al que estaban sometidas las plantas. Tal y como se puede observar en la figura 49, tanto el rendimiento como el tamaño de las panículas de todas las posiciones (excepto P2) fueron superiores en W1.



**Fig. 49 Influencia del manejo de agua en el peso (A) y tamaño de las panículas (B) en las diferentes posiciones en el año 2007 en condiciones de daños de las plántulas por una aplicación herbicida.**

Unidades y acrónimos: TP (tallo principal); W1 (lámina continua a 7 cm); W2 (riego intermitente a 3 cm)

Para la interpretación de los resultados, una vez más hay que considerar el efecto de la aplicación herbicida sobre el cultivo. Así pues, los resultados sugieren en primer lugar, que hubo una interacción entre los efectos del herbicida en el cultivo y el manejo de agua, de manera que en condiciones de lámina continua el desarrollo y rendimiento de las plantas fue superior que en riego intermitente. En segundo y último lugar, que los efectos del herbicida trascendieron en todas las fases del ciclo del cultivo, a pesar que varios días después de la aplicación el cultivo aparentaba estar recuperado. Por tanto, este año el ahijamiento precoz resultó desventajoso porque estaba sometido a una baja disponibilidad de nutrientes dada la mala condición de las hojas que los sustentaban y el posible débil desarrollo radical que impedía una captación eficaz de los nutrientes.

En 2008 y 2009, las medias del rendimiento en planta fueron superiores en W1 (5.6 y 4.3 g x planta<sup>-1</sup> en 2008 y 2009, respectivamente) respecto W2 (4.7 y 3.9 g x planta<sup>-1</sup>). Para explicar este comportamiento hay que considerar la

interacción entre los factores manejo de agua y fertilización nitrogenada, que aunque no fue significativa, se observaron respuestas diferentes, concretamente en la combinación riego intermitente con fertilización tardía (W2N2).

**Tabla 38 Influencia del manejo de agua y la fertilización nitrogenada en el rendimiento en planta y sus componentes.**

	W	N	RendPI	NPPI	NGP	RendP	FertPI
2008	W1	N1	5.6±1.4	2.8±1.0	70.7±18.7	2.2±0.7	84.3±4.9
		N2	5.5±1.2	2.5±0.7	82.2±33.8	2.0±0.8	85.8±4.5
	W2	N1	5.9±1.4	2.4±0.8	106.9±82.6	2.1±0.7	82.0±2.6
		N2	3.5±0.7	2.6±0.6	47.1±10.6	1.9±0.8	84.0±4.7
2009	W1	N1	4.3±0.5	2.2±0.5	61.0±9.1	2.0±0.8	92.5±1.5
		N2	4.3±1.1	2.1±0.5	65.3±3.4	2.1±0.8	91.7±1.9
	W2	N1	4.2±1.3	2.3±0.6	58.6±4.9	1.9±0.7	92.3±1.9
		N2	3.5±0.7	1.8±0.3	59.1±6.0	1.9±0.9	92.4±1.9

Unidades y acrónimos: RendPI (rendimiento en planta, g); NPPI (número panículas x planta<sup>-1</sup>); RendP (Rendimiento x panícula<sup>-1</sup>, g); FertPI (fertilidad media de las panículas,%); W1 (lámina continua a 7 cm); W2( riego intermitente a 3 cm); N1 (fertilización precoz); N2(fertilización tardía)

Los resultados de la tabla 38 muestran como la combinación W2N2 fue menos productiva que el resto de los tratamientos comparados. No se han incluido los resultados de 2007 porque se consideró un caso distinto que ya había sido objeto de análisis. En 2008, la menor producción se debió al menor peso y tamaño de panícula mientras que 2009 al menor número de panículas, que no fue compensado con un aumento del tamaño de panícula. Además, también coincidió que este tratamiento fue el que menor número de tallos produjo. Por tanto, si no se incluye el tratamiento W2N2, se observó que en 2008 las plantas en W2 produjeron más que W1 mientras que en 2009 los rendimientos se

igualaron. La mayor producción de 2008 se explica por el mayor tamaño de panículas. Finalmente, destacar la combinación W2N2 como la peor para el desarrollo y la producción de las plantas cuyos resultados parecen indicar que aportan condiciones de estrés en el desarrollo de la planta probablemente debido a un crecimiento vegetativo deficiente tal y como se mostró en la sección sobre la influencia estos dos factores en el apartado 3.2.3.3 (*Dinámica del ahijamiento*).

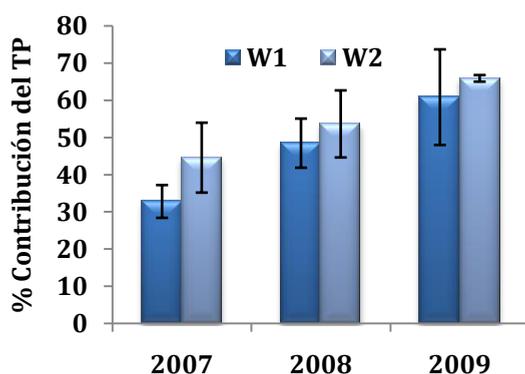
#### *c.1.2 Contribución al rendimiento en planta de las panículas según el orden*

Los mayores efectos del manejo de agua en la contribución al rendimiento de las panículas tuvieron lugar sobre el tallo principal, cuyos porcentajes se mantuvieron superiores en W2 en los tres años de estudio (Tabla 39 y Fig. 50). En 2007, se observaron diferencias más acentuadas debido al diferente número de panículas por planta. En 2008 y 2009, aun sin diferencias en el número de panículas por planta, la diferencia entre ambos tratamientos es de 5 puntos a favor de W2. Por tanto, debió existir otro factor en estos dos años que influyó en la distribución del rendimiento en las panículas. La mejor condición de desarrollo en los primeros estadios facilitados por el riego intermitente superficial intensificaron la superioridad competitiva del tallo principal respecto los primarios proporcionándole una mayor habilidad para la captación de recursos y síntesis de asimilados. Además, los resultados sobre la eficiencia del ahijamiento indicaron mayores porcentajes de mortalidad en W2 que en W1, permitiendo una mayor traslocación de los asimilados hacia el TP provenientes de los tallos no supervivientes.

**Tabla 39 Influencia del manejo de agua a la contribución de las panículas al rendimiento de la planta según su posición (2007-2009).**

Posición panícula	2007		2008		2009	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2
TP	32.8±4.4a	44.6±9.4a	48.5±6.6a	53.6±9.0a	60.8±12.9a	65.9±0.9a
1	0.2 ±0.4e	1.1 ±0.3c	0.6±1.0de	1.3±0.9cd	3.2±1.1c	1.0±3.2c
2	2.8±2.9de	3.5 ±1.05c	7.5±2.0cd	10.0±2.1bc	16.4±6.0b	13.9±8.4b
3	8.5 ±3.3cd	14.2±4.2b	10.6±1.4bc	10.5±3.1b	12.4±3.6bc	13.8±5.5bc
4	17.1 ±1.9b	18.7±3.7b	17.6±0.8b	15.7±1.6bcd	5.0±5.5c	5.1±3.4c
5	17.8 ±2.9b	13.6±5.3b	13.0±5.0bc	7.6±3.7bcd	2.1±0.7c	0.4±2.0c
6	12.7±1.7bc	4.0±0.7c	2.0±1.3de	1.4±0.5cd		
7	6.5 ±5.3cde	0.3±0.4c	0.1±0.2de			
8	1.7±1.7de		0.6±1.0de			

Unidades y acrónimos: W1 (lámina continua a 7 cm); W2( riego intermitente a 3 cm)  
 La misma letra dentro de cada año y tratamiento indica diferencias significativas (LSD, p<0.05).



**Fig. 50 Influencia del manejo de agua en la contribución del tallo principal al rendimiento en planta en los años 2007 hasta el 2009.**

En cuanto a los tallos primarios, las principales diferencias se volvieron a registrar en 2007 donde se observó que en W1 las posiciones más tardías cobraban más importancia, especialmente P5 y P6 con 4 y 8 puntos de diferencia entre ambos tratamientos. En 2008 y 2009 las diferencias se

atenuaron y mientras que en 2008 W2 favoreció la contribución de la posición P2 en detrimento de la P5, en 2009 sólo en P2 hubo diferencias en las medias y a favor de W1.

Por tanto, el riego intermitente superficial (W2) favorecería la contribución del tallo principal y también podría ejercer este efecto en los tallos primarios de posiciones más bajas, aunque en este último caso de forma menos clara. Estos resultados contrastan con los aportados por Yan, *et al.* (2009) donde no detectaron diferencias en la contribución de los tallos primarios al rendimiento cuando compararon el cultivo de arroz irrigado con el no-irrigado. Sin embargo, la ausencia de efecto podría estar motivada por la baja producción de tallos registrada en el experimento atribuida, según los autores, a elevadas temperaturas registradas. Por lo tanto, una baja capacidad de ahijamiento del cultivo habría podido impedir poner de manifiesto los efectos de la irrigación en la contribución de los tallos primarios al rendimiento. Por otro lado, no se han encontrado estudios sobre la influencia del manejo de agua en la contribución de los tallos excepto en condiciones de estrés hídrico y en el cultivo del trigo, donde Elhani, *et al.* (2007) hallaron una relación positiva entre la contribución del tallo principal y las condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, en este experimento la reducción de la aportación de los tallos primarios fue debida a decrecimiento del 50% de su rendimiento, mientras que en nuestro caso el comportamiento se explicó por las relaciones competenciales en la traslocación de asimilados establecidas entre tallo principal y los primarios.

## *c.2 Fertilización nitrogenada*

Se presentan los resultados obtenidos sobre la influencia del momento de la fertilización nitrogenada en el estadio de ahijamiento en la contribución al rendimiento según la posición de las panículas. Los valores corresponden a las medias anuales obtenidas por cada posición en ambos tratamientos de fertilización.

### *c.2.1 Rendimiento y componentes del rendimiento en planta*

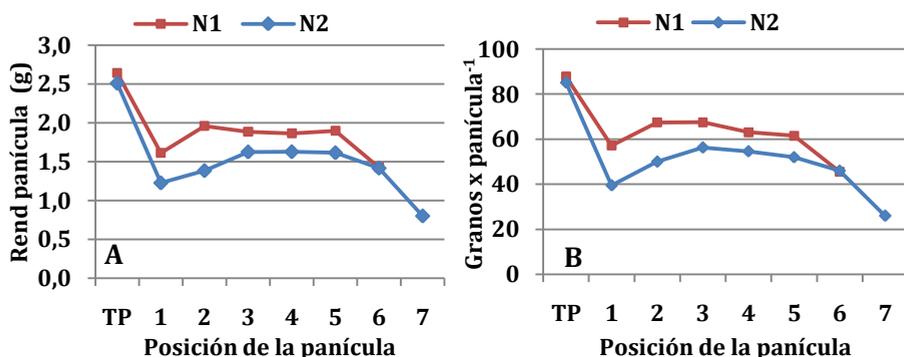
En primer lugar, en la tabla 40 se observa la influencia positiva de la fertilización precoz (N1) sobre el rendimiento de la planta en 2008 y 2009, si bien estas diferencias no fueron significativas. En 2007 no hubo respuesta del rendimiento a la fertilización tal y como muestra la semejanza de valores entre N1 y N2. En 2008 el efecto de la fertilización sobre el rendimiento tuvo lugar a través de el tamaño de la panícula (72.3 y 66.5 en N1 y N2, respectivamente) mientras que en 2009 mediante el número de panículas por planta (2.3 y 1.9 en N1 y N2, respectivamente). Este último año, la superioridad de panículas en N1 fue compensada con el tamaño de panícula aunque no fue suficiente como para contrarrestar los efectos en el rendimiento.

Por lo tanto, una aplicación del abono nitrogenado al inicio del ahijamiento (3.5 hojas) favoreció el rendimiento. No se observaron estos efectos en 2007, puesto que la fertilización precoz pudo no haber sido captada por los tallos de posiciones inferiores debido su mal estado por la aplicación herbicida.

**Tabla 40 Influencia del momento de la fertilización nitrogenada en el ahijamiento en el rendimiento y sus componentes en la planta (2007-2009).**

	2007		2008		2009	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
DPL	129.6±63.4	124.4±63.0	222		250	
RendPl	6.6±4.0	6.8±3.7	5.8±1.4	4.5±1.4	4.3±0.9	3.9±0.9
NPPI	3.2±1.2	3.7±1.4	2.6±0.9	2.6±0.6	2.3±0.5	1.9±0.4
Peso Pan	2.3±0.8	2.2±0.8	2.1±0.7	2.0±0.8	2.08±0.8	1.9±0.7
NGP	76.3±24.9	73.5±25.0	72.3±24.0	66.5±25.1	59.5±23.0	62.6±26.3
FertPl	87.7±8.6	87.7±10.0	83.3±9.7	85.4±9.7	92.5±4.3	92.1±5.5

Unidades y acrónimos: RendPl (rendimiento x planta<sup>-1</sup>); NPPI (número panículas x planta<sup>-1</sup>); Peso pan (peso panícula, g); NGP (tamaño medio panículas); FertPl: fertilidad media de las panículas). W1 (lámina continua a 7 cm); W2( riego intermitente a 3 cm):N1 (fertilización precoz); N2(fertilización tardía)



**Fig. 51 Influencia de la fertilización nitrogenada en el peso (A) y tamaño de panícula (B) en posiciones de las panículas en 2008.**

### c.2.2 Contribución al rendimiento en planta de las panículas según el orden

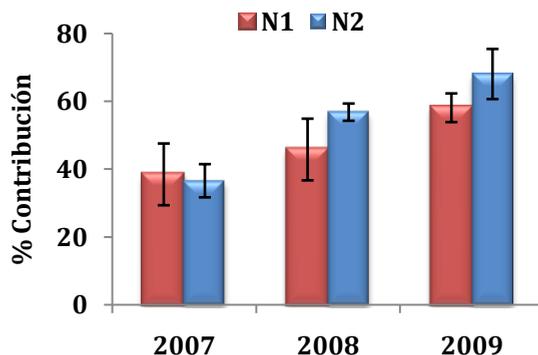
La contribución del tallo principal al rendimiento en planta fue superior en 2008 y 2009 en fertilización tardía (N2), mientras que en 2007 sólo se registró una leve superioridad a favor de N1 (Tabla 40 y Fig.51). La mayor aportación

del TP en 2008 se explica por la relación de pesos y tamaño de panícula entre el TP y los tallos primarios. Este año, el peso de las panículas así como el número de granos por panícula en los tallos primarios fue superior en N1 (Tabla 40 y Fig.51). Además, la diferencia de la media del peso de las panículas primarias respecto el tallo principal era menor en N1 (31%) que N2 (46%), indicando una mayor distribución entre los nudos. En 2009, la mayor contribución del tallo principal en N1 se explica por el menor número de panículas (Tabla 41).

**Tabla 41 Influencia de la fertilización nitrogenada en la contribución de los tallos (%) al rendimiento de la planta en los años 2007 hasta 2009.**

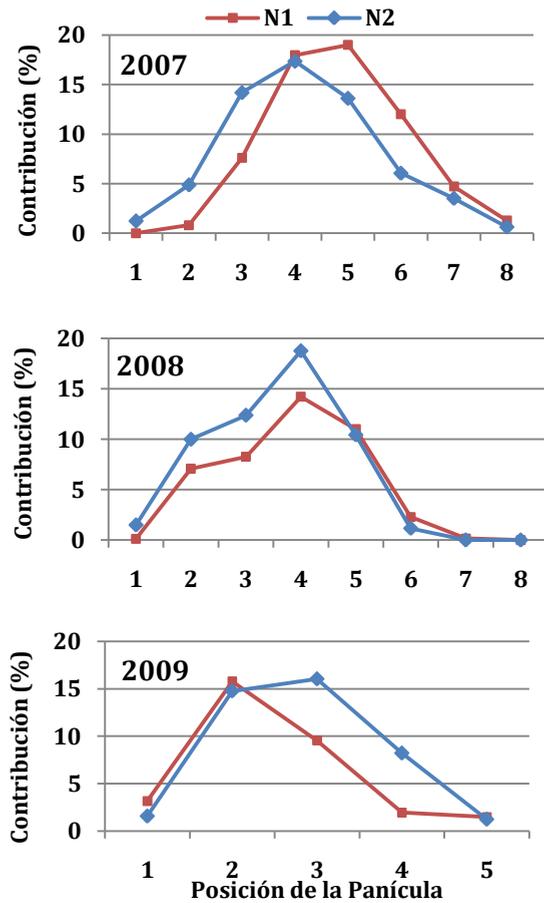
Posición panícula	2007		2008		2009	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
TP	36.6±4.90a	38.5±9.1a	45.8±9.1	56.9±2.5a	68.1±7.4a	58.2±4.2a
1	0.0 ±0.0	1.2 ±0.8e	1.5±0.3cd	0.1±0.2e	3.2±3.1c	1.6±1.5c
2	0.8 ±0.7d	4.9 ±2.7cde	10.0±0.2bcd	7.1±3.4cde	15.8±9.6b	14.8±3.6b
3	7.6 ±2.1cd	14.2 ±2.3bc	12.4±5.5b	8.3±2.5bcd	9.5±5.4bc	16.0±3.5bc
4	18.0 ±1.9b	17.4±4.0b	18.7±2.8b	14.2±2.3b	1.9±1.0c	8.2±3.9c
5	19.0 ±4.1b	13.6±4.3cde	10.4±1.2bc	11.0±5.0bc	1.5±1.3c	1.2±0.4c
6	12.0 ±1.7bc	6.1 ±0.3cde	1.2±0.7cd	2.3±1.9de		
7	4.7 ±3.1cd	3.5±4.3e	0.0d	0.0de		
8	1.3 ±1.1d	0.6±1.1e	0.0	0.0		

Unidades y acrónimos: TP (tallo principal); N1 (fertilización precoz); N2(fertilización tardía)



**Fig. 52 Influencia de la fertilización nitrogenada en la contribución del tallo principal al rendimiento de la planta en los años 2007 hasta 2009.**

En cuanto a los tallos primarios (Fig.53), en los años 2007 y 2008 las panículas P2 y P3 aportan un mayor porcentaje al peso total de la planta en N1 que en N2. En 2008 esta superioridad también incluye la cuarta posición, mientras que las diferencias entre tratamientos en 2009 se sitúan en P3 y P4 a favor otra vez de N1. Por tanto, la menor aportación del tallo principal observada en N1, se compensa a través de las panículas primarias. El comportamiento observado en 2008 y 2009 indica que el momento de fertilización nitrogenada presenta su principal efecto en la distribución de los pesos entre el tallo primario y las panículas primarias. Sin embargo, en 2007 este efecto no se encontró y la diferenciación entre tratamientos se basó en el reparto entre las panículas primarias, a favor de los nudos más bajos en N1.



**Fig. 53** Influencia de la fertilización nitrogenada en la contribución de las panículas primarias en el rendimiento de la planta.

### **3.3 DINÁMICA POBLACIONAL DEL AHIJADO Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO**

#### **3.3.1 Caracterización de la dinámica poblacional y su relación con el rendimiento y los componentes del rendimiento.**

La caracterización de la dinámica poblacional consiste en el estudio de la evolución del número de tallos por unidad de superficie a lo largo del ciclo, considerando el cultivo como una población de tallos y no de plantas. Con este cambio de perspectiva, se pretende realizar un estudio del ahijado desde una visión más global del cultivo, aportando de esta manera un análisis más agronómico de las relaciones establecidas entre el medio y el cultivo a través la fase del ahijamiento.

Los datos corresponden a las valoraciones realizadas en microparcels de 0.126 m<sup>2</sup> ubicadas en dos (año 2007) y tres (años 2008 y 2009) de las cuatro repeticiones de los experimentos 1 y 2. El objeto de estudio de este experimento fue:

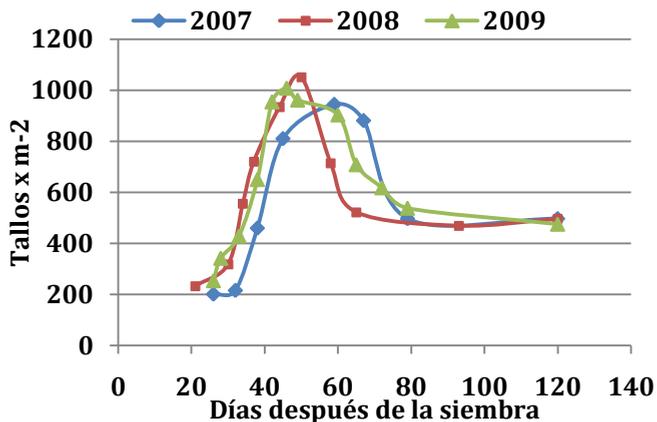
- La evolución del número de tallos para describir la dinámica poblacional del ahijado.
- La fase de máximo ahijado (FMA), considerando el momento y el número máximo de tallos (NMT) alcanzado. Este término permite cuantificar la capacidad de ahijado del cultivo en las condiciones ambientales determinadas
- El momento en que se fija el número de panículas después de un periodo de senescencia de tallos así como el número resultante de panículas, cuya importancia reside en ser un componente del rendimiento

✿ La eficiencia del ahijado que permite la evaluación global del proceso y que se calculó siguiendo la misma ecuación descrita en la sección 3.2.3.2 *Dinámica del ahijado en la planta* (Ec.4).

$$\text{Eficiencia ahijamiento (\%)} = \frac{\text{Número panículas}}{\text{Número máximo de tallos}} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Seguidamente, se presentan los resultados del rendimiento y los componentes del rendimiento en los experimentos 1 y 2. La conjunción de los dos resultados permitirá conocer cómo influye la dinámica del ahijamiento en el rendimiento y evaluar la repercusión de las diferentes prácticas agronómicas (densidad de planta, fertilización nitrogenada y manejo de agua) y del uso de variedades en esta relación.

La figura 54 muestra la evolución de tallos por m<sup>2</sup> en los tres años de estudio.



**Fig. 54 Dinámica poblacional del ahijado en los años 2007-2009.**

En la tabla 42 se muestran los valores medios de los principales descriptores de la dinámica del ahijado: fase máximo ahijado, tallos productivos y eficiencia del

proceso. Todos los años se partió de medias de densidades de planta muy parecidas, aunque en 2007 hubo una importante heterogeneidad, con desviaciones estándar de 63 plantas. En 2007 y 2008, los datos utilizados corresponden a la media global del experimento de interacción puesto que no hubo diferencias significativas de densidad de planta entre ambos tratamientos ni interacción entre ellos. En 2009, el factor dosis de siembra se excluyó de este experimento.

**Tabla 42 Estadios y eficiencia del ahijado en los años 2006-2009.**

Año	Densidad de planta	Fase Máximo Ahijado		Densidad panículas		Duración	Ef
		DDS	NT	DDS	NP		
2007	215.0±63.0	59	981.0±224.0	79	496.7±87.8	53	52.4±11.9
2008	232.5±36.4	50	1055.9±175.8	75	496.0±63.1	47	47.4±5.0
2009	253.9±0.00	46	1034.4±151.4	79	475.5±75.2	53	46.2±5.2

Unidades y acrónimos: NT (Número de tallos x m<sup>-2</sup>; NP (panículas x m<sup>-2</sup>); Densidad de planta, (plantas x m<sup>-2</sup>); DDS(días después de la siembra); duración (días); Ef(eficiencia, %).(media±desvest)

Al inicio del ahijamiento de 2007 y de 2008, el incremento del número de tallos sucedió de forma lenta, especialmente en 2007 donde el incremento de tallos de los 26 hasta los 32 días después de la siembra (DDS) fue de 2.5 tallos por m<sup>2</sup> y día. En cambio, en 2009 el incremento fue de 29 tallos x m<sup>-2</sup> x día<sup>-1</sup> des de 26 hasta 28 DDS. Un temprano y rápido crecimiento vegetativo es indicativo de la abundancia de recursos (Dingkuhn y Kropff, 1996). La aportación de inputs y las condiciones meteorológicas en los tres años fueron las mismas, por lo que se deduce que en 2009 el cultivo estaba en mejores condiciones de captar y asimilar los recursos.

La fase de máximo ahijado (FMA) tuvo lugar a los 59, 50 y 46 DDS en 2007, 2008 y 2009, respectivamente. 2007 presentó un retraso en alcanzar esta fase de unos 10 días respecto los otros años. Por tanto, el tiempo necesario para alcanzar el número máximo de tallos (NMT) se relacionó negativamente con el tiempo de establecimiento del cultivo. El NMT producidos estuvo comprendido entre los 981.0 alcanzados en 2007 hasta los 1055.9 en 2008.

La duración del ahijado, considerando el periodo entre el inicio y el momento en que se estabiliza el número de tallos, fue variable. En 2008 el descenso en el número de tallos a partir de la FMA fue muy abrupto, con una mortalidad alta y rápida donde desaparecieron 560 tallos en 15 días que, asumiendo una tasa de mortalidad constante, significa la senescencia de  $22.4 \text{ tallos} \times \text{m}^{-2} \times \text{dia}^{-1}$ . En 2007 resultó una tasa de mortalidad muy parecida ( $24.2 \text{ tallos} \times \text{m}^{-2} \times \text{dia}^{-1}$ ) pero el periodo de senescencia fue más largo (20 días). Finalmente, lo que caracterizó el 2009 fue el alargamiento del periodo de senescencia, de 33 días, durante el cual murieron 558.9 tallos, resultando de esta manera una menor tasa de mortalidad ( $16.8 \text{ tallos} \times \text{m}^{-2} \times \text{dia}^{-1}$ ). La mortalidad de los tallos depende principalmente de la competitividad establecida entre los tallos por los carbohidratos sintetizados y por el nitrógeno absorbido desde la FMA hasta el espigado (Nuruzzaman, *et al.*, 2000).

Los valores más estables en el tiempo fueron los aportados por la densidad de panícula, entre las 475.5 y los 534.5 panículas  $\times \text{m}^{-2}$ , con una variación de sólo 59 panículas en los tres años.

El primer año se mostró cómo el más eficiente en el ahijado, con valores superiores al 50%, mientras que en 2008 y 2009 el porcentaje de tallos

productivos respecto el total producido fue del 47y 46% en 2008 y 2009, respectivamente.

La dinámica observada en 2009 comparada con los años previos presentó las mismas características en la producción de tallos que las observadas en arroz híbrido: inicio precoz de la emergencia de tallos, aumento rápido y linear del número de tallos y adelanto de la fase de máximo ahijado. La mayor tasa de crecimiento durante la fase vegetativa registrada en las variedades híbridas contribuye al rendimiento por su relación positiva con la acumulación de biomasa e índice de cosecha (Bueno y Lafarge, 2009). Su comportamiento también está en la misma línea que el observado por Pasuquin, *et al.* (2008) en plántulas trasplantadas en estadios más precoces, coincidiendo también en los menores porcentajes de eficiencia. Concluyeron este estudio asociando el mayor rendimiento a una producción de tallos anticipada a pesar de los valores de eficiencia más bajos. Sin embargo otros autores apuntaban que una excesiva producción de área foliar promovida por el ahijado podría ser la causa de una reducción del rendimiento potencial por el incremento del sombreado mutuo y por las pérdidas de carbono por respiración y senescencia de los tallos durante la fase reproductiva (San-oh, *et al.*, 2004). En los apartados posteriores se comprobará la relación establecida entre la fase vegetativa y el rendimiento donde se comprobará si el estímulo del ahijamiento representa una penalización al rendimiento o si, por el contrario, es condición necesaria para el aumento del potencial productivo.

### **3.3.2 Rendimiento y componentes del rendimiento**

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos en referencia al rendimiento y los componentes del rendimiento. En 2007, las valoraciones se

realizaron en la subparcela de manera que el análisis sobre el efecto de la dinámica del ahijamiento sobre el rendimiento se realizó a partir de datos procedentes de diferentes unidades experimentales: la subparcela para el rendimiento y la microparcela para la dinámica poblacional. Se consideró que el diferente origen de los datos pudo haber causado imprecisiones en el análisis de los datos y camuflar posibles relaciones existentes. Consecuentemente, a partir del 2008 se decidió valorar el rendimiento de las microparcels emplazadas en tres de las cuatro repeticiones de cada experimento. Con este cambio se consiguió mejorar la homogeneidad de los resultados y la precisión en la evaluación de relaciones entre la dinámica del ahijamiento y el rendimiento.

En la tabla 43 se exponen los valores medios anuales de rendimiento, componentes del rendimiento y el número de granos por m<sup>2</sup> o sumidero.

**Tabla 43 Rendimiento y componentes del rendimiento en los años 2007 hasta 2009.**

Año	DPL	R	NP	NGP	FERT	PMG	NGM2
2007	127.0±30	776.2±11	473.6±11	62.4±3.2	87.7±9	33.9±0.5	29529.5 ±2087.0
2008	232.5±38	961.5±20	496.0±20	59.8±1.6	84.3±10	35.4±0.2	29557.6 ±1387.9
2009	254.0±36	1003.2±51	475.5±51	58.1±4.5	92.3±5	35.5±0.3	27481.9± 1029.0

Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); R (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>); NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); FERT (fertilidad, % granos llenos); NGM2(número granos x m<sup>-2</sup>).

Los resultados obtenidos señalaron el año 2009 como el más productivo (1003.2 g x m<sup>-2</sup>) respecto 2007 y 2008 (776.2, 961.5 g x m<sup>-2</sup>) cumpliéndose las predicciones planteadas durante las secciones previas sobre la influencia del ahijamiento precoz en el rendimiento. Los mayores rendimientos obtenidos en

2009 se explicaron por el mayor peso de los granos, el porcentaje de llenado de los granos y estuvo relacionada negativamente con el tamaño de las panículas (NGP). La capacidad sumidero (NGM2) fue inferior en 2009 a pesar del mayor en el rendimiento.

Después de la determinación y evaluación de los componentes del rendimiento se realizó un análisis de correlación lineal simple de los diferentes parámetros para evaluar el grado de asociación lineal entre ellos (Tabla 44).

**Tabla 44 Matriz de correlación de coeficientes de Pearson entre el rendimiento, componentes del rendimiento y el tamaño sumidero (2007-2009).**

	DPL	R	NP	NGP	FERT	PMG	NGM2
DPL	1						
R	0,964***	1					
NP	0,095	0,242	1				
NGP	-0,668*	-0,662	-0,520	1			
FERT	0,241	0,227	-0,402	-0,137	1		
PMG	0,909***	0,848**	0,064	-0,536	0,117	1	
NGM2	-0,562	-0,39047	0,498	0,472	-0,561	-0,50309	1

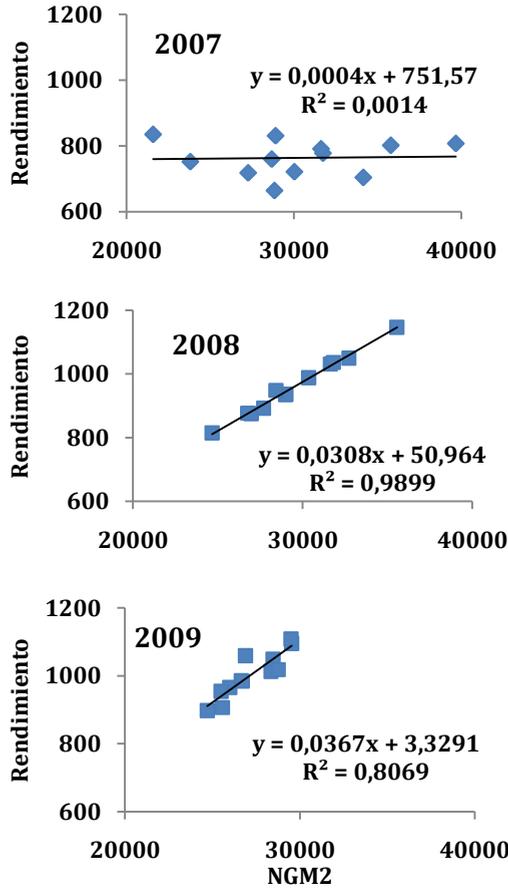
Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); R (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>); NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); FERT (fertilidad, % granos llenos); NGM2(número granos x m<sup>-2</sup>).

\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

El análisis de correlación señaló la densidad de planta como el parámetro con mayor número de relaciones significativas con los otros elementos. La correlación fue positiva, con coeficientes cercanos a la unidad, con el rendimiento y el peso de mil granos (PMG) mientras que se correlacionó negativamente con el tamaño de las panículas. Ciertamente, la mayor densidad

de planta si bien no afectó a la densidad de panícula (número panículas x m<sup>-2</sup>), sí provocó una disminución del número de granos por panícula que fue posteriormente compensado por el llenado de los granos. El rendimiento presentó una correlación significativa y positiva con el PMG mientras que negativa con el tamaño de la panícula (NGP) con una probabilidad cercana al nivel de significación (p=0.051).

Diversos estudios presentan la capacidad sumidero, esto es, número de granos x m<sup>-2</sup> (NGM2), como determinante de rendimiento (Lubis, *et al.*, 2003; Xie, *et al.*, 2008; Lafarge y Bueno, 2009). La capacidad sumidero está determinada por el comportamiento del cultivo antes del espigado (Yoshida, 1981) y es función de la concentración de nitrógeno en planta, del peso seco de la parte aérea en inicio de panícula y del tamaño de los granos que limitarán el peso que puedan alcanzar (Horie, 2001, citado en Lubis, *et al.*, 2003). Contrariamente, los resultados obtenidos no han seguido este comportamiento. La heterogeneidad obtenida en campo durante el 2007 fue considerada como un posible factor de interferencia en esta correlación, por lo que se decidió realizar otro análisis incluyendo sólo los datos de 2008 y 2009. Efectivamente, los resultados indicaron una alta correlación positiva entre el NGM2 (r=0.71, p<0.001) en 2008 y 2009 (Fig.55).

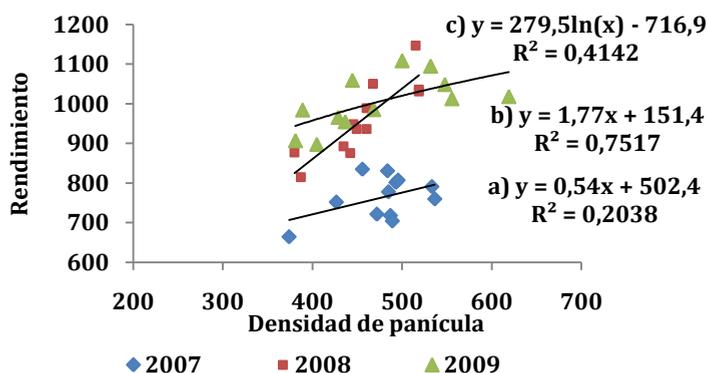


**Fig. 55 Relación entre la capacidad sumidero**

(NGM2, número granos x m<sup>-2</sup>) y el rendimiento (g x m<sup>-2</sup>) en los años 2007 hasta 2009.

Lo mismo sucedió en el caso de la densidad de panículas (Fig. 56), cuya relación con el rendimiento ha sido ampliamente citada en diversos estudios (Casanova, *et al.*, 2002; Shahidullah, *et al.*, 2009). Una vez más, resultó una correlación positiva y altamente significativa ( $r=0.610$ ,  $p<0.01$ ) cuando se excluyeron los datos procedentes de 2007, cuyas medias anuales no mostraron ninguna relación entre NP y NGM2. Sin embargo, la disposición de los valores de 2009

sugirió que una función logarítmica podría proporcionar un mejor ajuste ( $R^2=0.414$ ) que una lineal ( $R^2=0.378$ ), de manera que el rendimiento se asintotizó a partir de las 500 panículas  $\times m^{-2}$  con valores en el límite superior entre los 1000 y 1100  $g \times m^{-2}$ . En cambio, la función de 2008 era claramente una función lineal tal y como indicaba su coeficiente de determinación ( $R^2=0.752$ ). Luego, la densidad de 500 panículas  $\times m^{-2}$  podría definirse como el umbral a partir del cual no hay respuesta en el rendimiento.



**Fig. 56 Relación entre densidad de panícula (panículas  $\times m^{-2}$ ) y rendimiento ( $g \times m^{-2}$ ) en 2007 (a), 2008 (b) y 2009 (c).**

Por otro lado, los análisis también indicaron que no hubo correlación entre el tamaño de las panículas (NGP) con el rendimiento en estos dos años. Además, se perdió la relación entre la densidad de planta y el rendimiento, indicando que para rangos de dosis de siembra entre 160 y 210  $kg \text{ semilla} \times ha^{-1}$ , el rendimiento es independiente de la densidad de planta.

Se deben destacar los elevados valores de porcentaje de granos llenos, o fertilidad, indicando una buena compartimentación de los asimilados (Yang, *et al.*, 2002) a pesar de no mostrar correlación con el rendimiento. Casanova, *et al.*

(2002), en su estudio sobre los factores limitantes del rendimiento en el cultivo del arroz en el Delta del Ebro, también concluyeron que la capacidad sumidero es el determinante del rendimiento y no la fuente de recursos entendida, según los autores, como la fracción de luz PAR (radiación fotosintéticamente activa) captada durante el ahijado y a la floración.

Por lo tanto, y a modo de resumen, los análisis de correlación indicaron que el rendimiento del cultivo obtenido en los tres años de experimentación se explicaba a través del tamaño de las panículas y del peso de los granos. No obstante, cuando se analizaron 2008 y 2009 por separado fue la capacidad sumidero (Lubis, *et al.*, 2003) a través de la densidad de panículas (Yan, *et al.*, 2009) quien determinó el rendimiento. La relación positiva entre el NGM2 o tamaño sumidero con el rendimiento ha sido descrita también en arroz cultivado en condiciones mediterráneas por Koutroubas y Ntanos (2003). En 2007, estos parámetros no fueron función del rendimiento, probablemente por el enmascaramiento de los resultados causado por la distribución irregular de las plantas en campo que también pudo haber ocasionado la contradicción de resultados observada según el agrupamiento anual de los datos. Estos resultados subrayan la importancia de la fase vegetativa para la determinación del rendimiento, puesto que la densidad de panículas se determina durante el ahijado.

### **3.3.3 Relación entre la dinámica poblacional del ahijado y el rendimiento**

Para determinar la influencia de la dinámica poblacional del ahijado en el rendimiento, se consideraron los parámetros del ahijamiento que permitían describir o caracterizar el proceso del ahijado a la vez que realizar análisis

cuantitativos del grado de relación entre ellos. Los parámetros escogidos fueron la calidad del ahijamiento, el número máximo de tallos (NMT) y la eficiencia del ahijado. El concepto de calidad del ahijamiento fue escogido para describir su precocidad pues un ahijamiento anticipado es significativo de una abundancia de recursos (Dingkuhn y Kropff, 1996; citado en Pasuquin, *et al.*, 2008) así como de una captación eficiente de éstos, dadas las óptimas condiciones del cultivo, con altas probabilidades de repercutir positivamente en el rendimiento.

El número máximo de tallos indica la capacidad productiva de tallos, por consiguiente también es significativo de la condición de desarrollo del cultivo pero además, de la disponibilidad de recursos y del grado de limitación que éstos representan para el crecimiento y progreso del ciclo.

Finalmente, la eficiencia del cultivo es un concepto integrador de las diferentes fases del ahijado (la producción y la senescencia de tallos) que cuantifica el balance global de este proceso. Una sobreproducción de tallos puede conllevar elevados índices de mortalidad y la subsiguiente pérdida de asimilados, representando un malgasto de recursos y energía que podría afectar negativamente al rendimiento (Shahidullah, *et al.*, 2009). Sin embargo, existen estudios que demuestran la traslocación de nitrógeno y carbono de los tallos senescentes a los supervivientes, aunque la efectividad del transporte es desconocida (Jang *et al.*, 1994, citado en Ao, *et al.*, 2009). Por otro lado, una de las funciones de los tallos es el almacenamiento de reservas (Matsuo y Hoshikawa, 1993) que podrán ser aprovechadas durante la traslocación de los asimilados durante la elongación del entrenudo, constituyendo una fuente útil de recursos que fomentarían la productividad de las panículas. Por lo tanto,

determinar la relación entre la eficiencia y el rendimiento permitiría una mejor comprensión del ahijamiento y su papel en la productividad del cultivo.

La tabla 45 muestra los valores de los coeficientes de correlación entre los diferentes parámetros estudiados: número máximo de tallos, número de panículas por m<sup>2</sup>, rendimiento, eficiencia del ahijado y número de granos por m<sup>2</sup>.

**Tabla 45 Matriz de correlación con los coeficientes de Pearson (r) entre el rendimiento, los componentes del rendimiento, el tamaño sumidero (NGM2) y la dinámica poblacional del ahijado ( 2007 -2009).**

	NMT	NP	R	Eficiencia	NGM2
NMT	1.000				
NP	0.480**	1.000			
R	0.265	0.358*	1.000		
Eficiencia	-0.633***	-0.242	-0.312	1.000	
NGM2	0.354*	0.559**	0.044	0.016	1.000

Acrónimos: NMT (número máximo de tallos); NP (número de panículas), R: (rendimiento), Eficiencia (%), NGM2 (número de granos por m<sup>2</sup>).

\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.0001

El factor más vinculado a los otros parámetros fue el número máximo de tallos, estableciendo relaciones positivas con la densidad y tamaño sumidero (NGM2) y negativas con la eficiencia. Por lo tanto, de forma indirecta un aumento en el NMT promovió el rendimiento del cultivo a través de su relación con la densidad de panículas y con la capacidad sumidero. Estos resultados concuerdan con los aportados por Samonte, *et al.* (2006) donde además también encontraron relaciones positivas con el peso de las hojas, la superficie

foliar y el peso de los tallos en el espigado. Las dos primeras correlaciones indicaron una mayor fuente de fotosintatos y la segunda un aumento de la capacidad de almacenaje temporal de carbohidratos. Estos resultados explicarían la relación positiva con el NGM2. El coeficiente de correlación entre el rendimiento y la eficiencia ( $r=-0.312$ ) mostró una probabilidad cercana al nivel de significación del 5% ( $p=0.07$ ) sugiriendo la relación negativa entre ambos pero que pudo ser resultado de la intervención de 2007 que presentó densidades de planta notablemente inferiores.

Siguiendo el mismo procedimiento de análisis que el realizado para los componentes del rendimiento, se procedió al estudio de los datos de 2008 y 2009 logrando de esta manera un análisis más consistente de las relaciones.

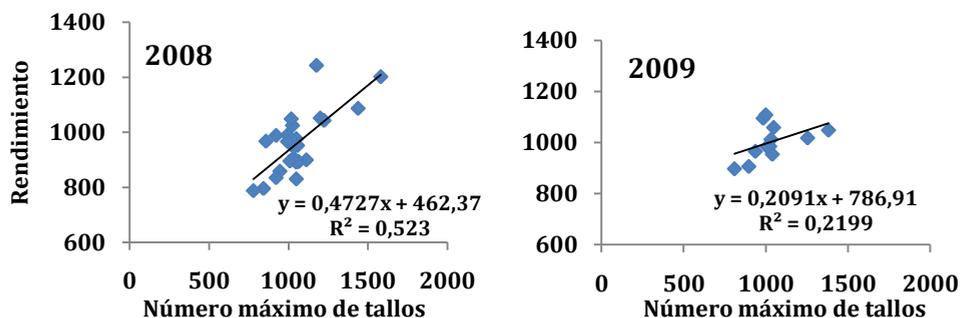
**Tabla 46 Matriz de correlación con los coeficientes de Pearson (r) entre el rendimiento, los componentes del rendimiento, el tamaño sumidero (NGM2) y la dinámica poblacional del ahijado en los años 2008 y 2009.**

Año	Parámetros de producción	NMT	NP	R	Eficiencia	NGM2
2008	NMT	1.000				
	NP	0.728***	1.000			
	R	0.723***	0.807***	1.000		
	Eficiencia	-0.574**	0.132	-0.073	1.000	
	NGM2	0.747***	0.826***	0.991***	-0.080	1.000
2009	NMT	1.000				
	NP	0.702*	1.000			
	R	0.469	0.614*	1.000		
	Eficiencia	0.373	0.299	0.077	1.000	
	NGM2	0.543	0.810**	0.898***	0.049	1.000

Acronimos: NMT (número máximo de tallos); NP (número de panículas), R: (rendimiento), Eficiencia (%), NGM2 (número de granos por m<sup>2</sup>).  
\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.0001

En 2008, el NMT estuvo relacionado positivamente con el rendimiento, la densidad de panículas y el NGM2 mientras que en 2009 se perdió esta relación directa pero se mantuvo de forma indirecta a través del NP y NGP. Estos resultados concuerdan con los aportados por Lubis, *et al.* (2003) señalando la producción de tallos como una característica productiva del cultivo. En cuanto a su relación con la eficiencia, en 2008 fue negativa mientras que en 2009 no se estableció ninguna relación entre ambos, lo que indica que un mayor desarrollo vegetativo no siempre viene seguido de mayores índices de mortalidad en los tallos sino que el estado del cultivo también interviene en esta regulación.

En la figura 57 se puede observar la regresión lineal entre las dos variables en los años 2008 y 2009 y sus coeficientes de determinación en 2008 ( $R^2=0.523$ ) y 2009 ( $R^2=0.220$ ).



**Fig. 57 Relación entre número máximo de tallos (tallos x m<sup>-2</sup>) y rendimiento (g x m<sup>-2</sup>) en 2008 y 2009.**

En cuanto a la relación entre el rendimiento y la eficiencia, esta vez el coeficiente de Pearson se alejó de la significación ( $p=0.48$ ) indicando en primer

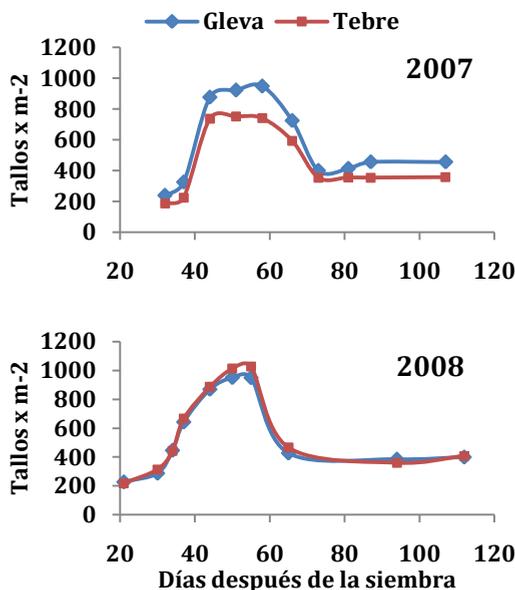
lugar que la comparación interanual debe realizarse bajo el mismo rango de densidad de planta y en segundo lugar, que la eficiencia del ahijado no intervino de forma directa en el rendimiento del cultivo. Este resultado era esperable teniendo en cuenta que para porcentajes de eficiencia similares (47 y 46% en 2008 y 2009, respectivamente), el rendimiento en 2009 ( $1003.2 \text{ g x m}^{-2}$ ) fue sensiblemente superior que en 2008 ( $961.5 \text{ g x m}^{-2}$ ). Este comportamiento sugiere la influencia del estado del cultivo y de la calidad del ahijado en la mortalidad de los tallos. En trigo de invierno se observó como los tallos sanos eran capaces de exportar carbono antes de morir (Berry, *et al.*, 2003), resultando en un balance positivo de los asimilados, donde la exportación de asimilados procedente de estos tallos fue superior a la cantidad que retuvieron. En nuestro trabajo, en 2009 la mortalidad en los tallos tuvo lugar principalmente en las primeras posiciones que eran las que presentaban mejores condiciones, tal y como indicaban los mayores porcentajes de desarrollo de las yemas (ver apartado 3.2.3), pudiendo realizar un mejor reaprovechamiento de los asimilados que en 2008. Esta diferenciación en la calidad del cultivo y del ahijado explicaría los mejores rendimientos en eficiencias similares.

Los resultados indicaron que para un rango de dosis de siembra de 160 a 210 kg semilla  $\times \text{ha}^{-1}$ , el mejor y más precoz establecimiento del cultivo resulta favorable para la obtención de mayores densidades de planta que repercutirán positivamente en el número de granos  $\times \text{m}^{-2}$  y consecuentemente, en el rendimiento de la planta. En estas dosis de siembra, la mayor producción de tallos se mostró como una condición necesaria para la obtención de elevados rendimientos del cultivo, aun obteniendo menores porcentajes de eficiencia del cultivo, pues su relación inversa con el rendimiento no se mostró en ningún caso significativa. Además, hay que tener en cuenta la influencia de la capacidad

y precocidad del ahijado, con mejores resultados también en 2009, que ha mostrado ser beneficiosa para el rendimiento. Mohapatra y Kariali (2008) observaron que la concentración de carbohidratos solubles y almidón eran superiores en las plantas con panículas de tallos precoces y crecimiento rápido debido al suministro más favorable de la fuente, esto es los tallos, y obtuvo una respuesta positiva del rendimiento.

### 3.3.4 Factores que afectan la dinámica poblacional del ahijado y su influencia sobre el rendimiento y los componentes del rendimiento.

#### 3.3.4.1 Variedades



**Fig.58 Dinámica del ahijado en las variedades Gleva, Tebre en 2007 y 2008.**

La figura 58 muestra la evolución de la densidad de tallos (tallos por m<sup>2</sup>) durante el ciclo del cultivo en las dos variedades utilizadas: Tebre y Gleva. En

2007, Gleva obtuvo un mayor número máximo de tallos, no significativo, debido al mayor número de plantas en la microparcela (238.1 plantas x m<sup>-2</sup>) que en Tebre (187.2 plantas x m<sup>-2</sup>). En cambio, en 2008, con la misma densidad de planta, se observó que las dos variedades tuvieron la misma dinámica poblacional.

#### **3.3.4.2 Densidad de planta**

En la tabla 47 se exponen los datos descriptivos de la dinámica del ahijamiento. Respecto al año 2007, sólo se muestran los tratamientos con diferencias significativas en la densidad de planta que fueron 60, 160, 210 y 320 kg semilla x ha<sup>-1</sup>. En la figura 59 se muestra la evolución de la densidad de tallos en las diferentes dosis a lo largo del ciclo del cultivo del arroz. En 2008 y 2009, las diferencias resultaron significativas entre las cuatro dosis de siembra utilizadas.

**Tabla 47 Caracterización de la dinámica del ahijado en diferentes densidades de planta en los años 2007 hasta 2009.**

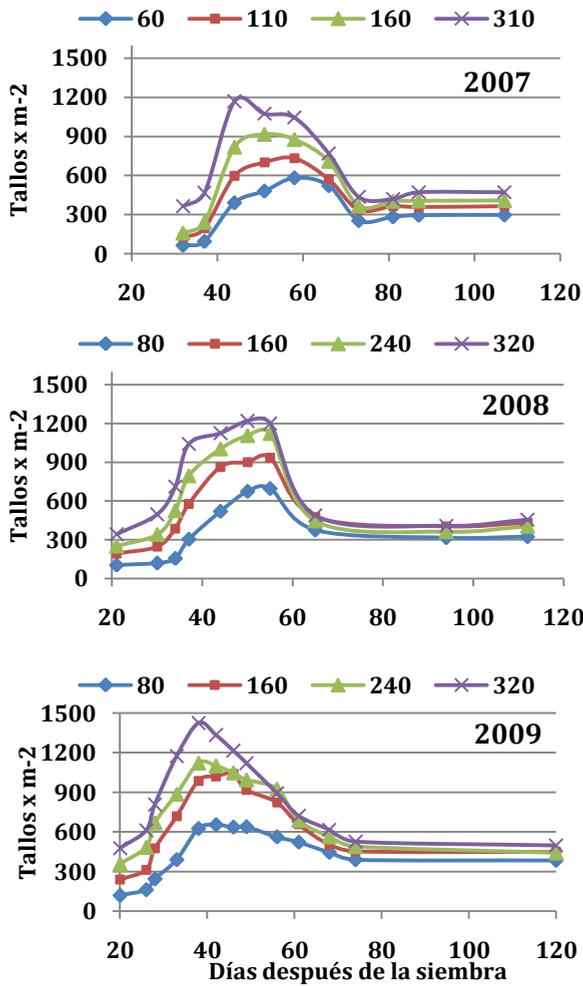
Año	DS	DPL	Fase máximo ahijado		Tallos productivos		Ef (%)
			DDS	NT	DDS	NP	
2007	60	65.5±27.8a	58	591.3±164 c	73	297.6±75.7bc	50.75±4.3a
	160	161.4±56.3b	51	957.7±126b	73	410.1±4.6ab	43.38±6.4b
	210	230.2±59.4c	44	892.9±280bc	73	436.5±101 ab	50.01±5.7b
	310	365.1±65.7d	41	1212.0±196a	73	472.2±113.1a	38.62±2.8b
	*			*		*	*
2008	80	103.2±12.96a	55	702.4±39.2c	65	323.4±25.4a	46.2±4.9
	160	192.5±9.99b	55	936.5±143.3b	65	430.56±81.0a	46.6±11.0
	240	252.0±17.6c	55	1132.9±82.6 a	65	404.8±55.37a	36.0±6.6
	320	343.3±17.6d	50	1230.2±155 a	65	456.4±39.15a	37.7±6.5
	*			*		ns	ns
2009	80	119±0.0	42	693.1±52.8 c	74	383.6±61.5b	55.1±4.7a
	160	238.1±0.0	46	1110.5±111 b	74	447.1±81.07a	40.6±5.7b
	240	357.1±0.0	42	1172.0±75.43b	74	441.8±27.9a	37.9±4.8b
	320	476.2±0.0	38	1460.3±103.2a	74	497.4±60.62a	34.0±1.8b

Unidades y acrónimos: DS (Dosis siembra, kg semilla x ha<sup>-1</sup>); DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); DDS (días después de la siembra); NT (número tallos x m<sup>-2</sup>); NP(número panículas x m<sup>-2</sup>) Ef(Eficiencia,%);

\*Diferencias significativas entre los tratamientos dentro de cada año; ns: diferencias no significativas. Separación de medias por el test de Duncan con un nivel de significación del 95%.

Se observó como las parcelas correspondientes a la dosis de siembra más baja no consiguieron alcanzar el número máximo de tallos obtenidos en las dosis superiores. Además, el aumento de la dosis de siembra ocasionó una disminución del tiempo necesario para alcanzar la fase de máximo ahijado coincidiendo con los resultados obtenidos por Valério, *et al.* (2008) y Rashid y Khan (2006) donde también se obtuvieron las mejores eficiencias en las densidades de planta más bajas. Según estos resultados, a partir de una densidad de 250 plantas x m<sup>2</sup> (exceptuando el 2007 que tiene una desviación

típica muy alta) la eficiencia descendió hasta valores entre el 35 y 39%. El mayor grado de competencia por los asimilados entre los tallos así como el efecto del sombreado mutuo provocó valores de senescencia más elevados en densidades de planta superiores (Lauer y Simmons, 1988). Cuando se compararon los valores de 2008 y 2009, se observó que dentro de la misma dosis de siembra, con medias de densidad de planta superior en 2008, la eficiencia se mostraba superior en 2009. Por ejemplo, a 80 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, la densidad de planta fue de 109 y 119 por m<sup>2</sup> en 2008 y 2009, respectivamente y la eficiencia fue casi 10 puntos superior en 2009 (55%) respecto 2008 (46%). La mortalidad de los tallos está relacionada con la concentración de nitrógeno foliar (Lin, *et al.*, 2005) y de la disponibilidad de asimilados (Lafarge, *et al.*, 2002). Desafortunadamente, no se evaluó la concentración del nitrógeno foliar aunque el mejor desarrollo vegetativo del cultivo en 2009 puede indicar una mejor captación de recursos y disponibilidad de asimilados que en 2008 y, por consiguiente, también de nitrógeno. Esta diferenciación en el estado del cultivo podría haber comportado las mejores eficiencias registradas.



**Fig. 59 Dinámica poblacional del ahijado en diferentes dosis de siembra en los años 2007 hasta 2009.** (Los valores de la leyenda son las dosis de siembra, en kg semilla x ha<sup>-1</sup>).

En la tabla 48 se muestran las medias anuales de rendimiento y sus componentes.

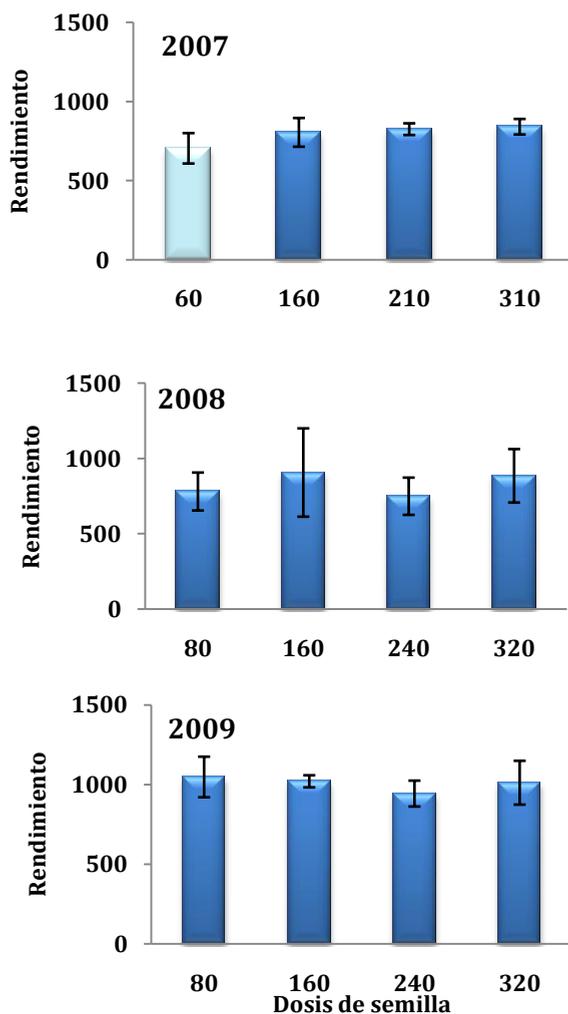
**Tabla 48 Parámetros productivos en diferentes dosis de siembra (2007-2009).**

Año	DS	DPL	R	NP	NGP	PMG	FERT	NGM2
2007	60	53.3±11.2 d	705.2±96 b	367.5± 63.4b	78.5± 15.8a	34.0± 0.9	97.5± 1.3	28646.4±6638.4
	160	131.0±22. 6c	806.1±90 a	426.2± 110.6a	71.3± 12.8b	34.5± 0.7	96.9± 94.7	29860.9±7913.9
	210	160.3±23. 7b	826.2±36 a	434.5± 92.4a	67.3± 8.5b	34.7± 0.4	97.4± 1.2	28937.7±5128.5
	310	244.7±23. 7a	841.7±49 a	469.0± 100.7a	61.9± 11.6b	34.4± 0.8	97.5± 1.4	28405.3±5190.4
		*	*	*	*	ns	ns	ns
2008	80	103.2±12. 9d	781.6±12	323.4± 25.4	68.7± 5.7a	35.0± 1.0a	90.0± 0.0	22275.0±3329.5
	160	192.5±10. 0c	907.8±293	430.6± 81.0	57.7± 8.7ab	35.9± 0.5ab	92.1± 0.0	25313.1±8219.4
	240	252.0±17. 6b	750.4±124	404.8± 55.4	51.5± 5.1ab	36.0± 0.5ab	91.5± 0.02	20826.0±3415.2
	320	343.3±17. 6a	886.0±178	456.3± 39.1	53.4± 7.3b	36.2± 0.9b	92.5± 0.01	24494.7±5107.1
		*	ns	ns	*	*	ns	ns
2009	80	119.0	1048.6±127	383.6± 61.6b	74.7± 10.8a	34.7± 0.9	97.5± 96.8	28442.9±4132.7
	160	238.0	1021.3±38	447.1± 81.0ab	63.5± 10.0a b	34.1± 1.1	96.8± 0.01	27873±1535.9
	240	357.0	944.3±91	441.8± 27.9ab	57.9± 1.3ab	34.4± 0.3	97.2± 0.0	25620.1±2148.8
	320	476.0	1012.6±137	497.3± 60.61a	55.1± 5.1b	34.8± 1.1	97.2± 0.0	27414.9±4474.9
			ns	*	*	ns	ns	ns

Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); R (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>); NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); FERT (fertilidad, % granos llenos); NGM2(número granos x m<sup>-2</sup>).

\*Diferencias significativas entre los tratamientos dentro de cada año; ns: diferencias no significativas. Separación de medias por el test de Duncan con un nivel de significación del 95%.

Los rendimientos obtenidos en las diferentes dosis de siembra, con rangos entre 80 y 320 kg semilla x ha<sup>-1</sup>, fueron los mismos y la única disminución significativa tuvo lugar en 2007, en la dosis de 60 kg semilla x ha<sup>-1</sup> (Tabla 48, Fig. 60). Estos resultados coinciden con los obtenidos por otros autores que concluyen que el rendimiento se mantiene estable en un gran amplio rango de dosis de siembra (Xie, *et al.*, 2008; Seetharama et al, 1984, citado en Yan, *et al.*, 2009). Sin embargo, Counce (1987) obtuvo una densidad óptima de planta en condiciones de siembra directa de 130-172 plantas x m<sup>-2</sup>. En el presente estudio, a partir de las 100 plantas x m<sup>-2</sup> se obtuvieron los mismos rendimientos. Casanova *et al.* (2002) en su estudio sobre los factores limitantes del rendimiento en el cultivo del arroz en el Delta del Ebro, marcó también una densidad mínima que en su caso fue de 160-180 plantas x m<sup>-2</sup>. Esta diferencia de valores puede ser debida a las dimensiones de las parcelas, que en esta tesis son reducidas por ser campos experimentales mientras que en el trabajo de Casanova son campos productivos de mayor superficie y, consecuentemente, con menor control sobre diferentes factores agronómicos. A pesar de esta estabilidad observada, se pudo apreciar que 2008 y 2009 ofrecieron los mayores rendimientos medios en las dosis más bajas: 160 en 2008 y 80 y 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup> en 2009.

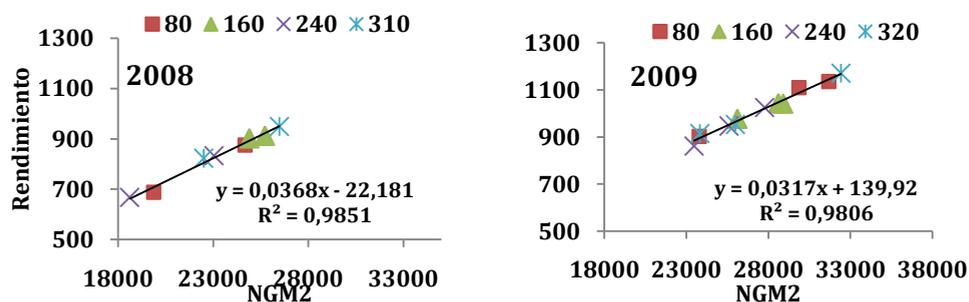


**Fig. 60 Rendimiento ( $\text{g} \times \text{m}^{-2}$ ) en diferentes dosis de siembra ( $\text{kg}$  semilla  $\times \text{ha}^{-1}$ ) en 2007 hasta 2009. Columna con diferente color indica diferencias significativas ( $P < 0.05$ )**

En 2008, sólo se encontraron diferencias significativas entre 80 y 320  $\text{kg}$  de semilla  $\times \text{ha}^{-1}$  en el tamaño de la panícula y en el peso de mil granos. En 2009,

las dosis 80 y 320 kg de semilla x ha<sup>-1</sup> presentaron las diferencias en densidad y tamaño de la panícula (granos x panícula<sup>-1</sup>).

La relación establecida entre la capacidad sumidero (NGM2) y el rendimiento siguió el mismo comportamiento anual que el observado en menores rangos de dosis de siembra. En 2008 y 2009, se presentó como factor determinante del rendimiento (Fig. 61) explicando en más de un 98% los cambios en el rendimiento, mientras que en 2007 no hubo correlación significativa entre ellos. Bueno y Lafarge (2009), establecieron que porcentajes en el llenado de los granos inferiores al 85% indicaban que la capacidad sumidero no es un factor limitante del rendimiento. Por consiguiente, los porcentajes obtenidos sobre el llenado de los granos, que superó en todos los tratamientos el 90 %, así como la respuesta lineal del rendimiento al NGM2 en 2008 y 2009 señalan la capacidad sumidero como el factor limitante. El análisis de 2007 necesitó de la consideración de otros parámetros y su desarrollo tiene lugar en párrafos posteriores.



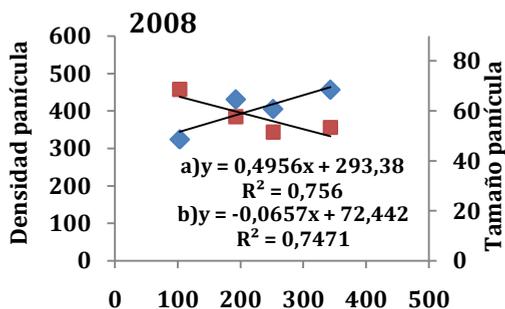
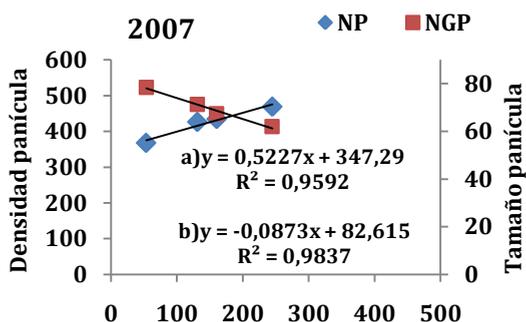
**Fig. 61 Relación entre rendimiento (g x m<sup>-2</sup>) y la capacidad sumidero (NGM2) en los experimentos de densidad de planta en los años 2008 y 2009. Los valores de la leyenda indican las dosis de semilla (kg semilla x ha<sup>-1</sup>).**

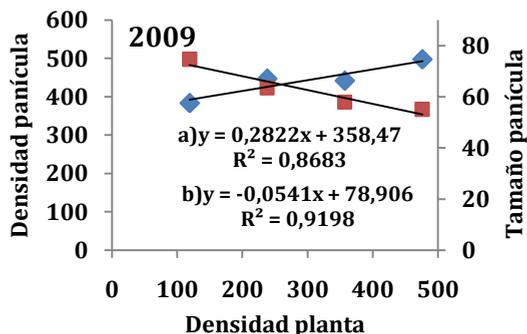
La densidad de panículas (NP) y el número granos por panícula (NGP) son las variables que definen la capacidad sumidero (Lubis, *et al.*, 2003). La densidad

de panículas mantuvo valores muy estables entre las diferentes dosis de siembra dentro de cada año, sin diferencias significativas en 2008, y sólo correlacionada positivamente con el rendimiento en 2007 (aunque sin significación:  $r=0.45$ ,  $p=0.051$ ; datos no mostrados). Los valores oscilaron entre las 367.5 panículas  $\times m^{-2}$  en una densidad de planta (DPL) de 53 por  $m^2$  (2007) y 497.3 panículas  $\times m^{-2}$  donde había de 476 plantas  $\times m^{-2}$  (2009). Así pues, la baja densidad de plantas fue subsanada por el ahijado a partir de dosis de siembra de 160 kg semilla  $\times ha^{-1}$ . En cuanto al NGP, se observó que disminuía a medida que aumentaba el NP, corrigiendo el exceso de panículas (Bond, *et al.*, 2008; Wells y Wade, 1978) mostrando una correlación significativa ( $r=-0.62$ ,  $p<0.05$ ). El número y tamaño de panículas se relacionaron negativamente en 2008 y 2009 ( $r= -0.71$  en 2008 y 2009;  $p<0.05$ ) mientras que no se obtuvo significación en 2007, probablemente debido a la heterogeneidad de los datos, puesto que las medias de los tratamientos sí mostraron cierto grado de asociación.

La figura 62 muestra como el NP y el NGP fueron función lineal de la DPL. La densidad de panícula mantuvo una respuesta positiva con la DPL mientras que el NGP fue negativo. Este comportamiento opuesto se explica por las relaciones compensatorias establecidas entre ellos. Al mismo tiempo, se observó que cuando la capacidad sumidero se relacionaba con el rendimiento (en 2008 y 2009) no había correlación del NP y el NGP con el rendimiento mientras que en 2007 se produjo la situación inversa: sin correlación entre NGM2 y rendimiento pero sí entre el rendimiento y el NP y el NGP. Además, en 2007 la densidad de planta y el rendimiento estuvieron correlacionados positivamente ( $r=0.65$ ,  $p<0.01$ ). Las correlaciones obtenidas en 2007 entre la densidad de planta y el rendimiento y entre el rendimiento con la densidad y tamaño de las panículas

indicaron que el ahijamiento no pudo compensar el bajo número de plantas por unidad de superficie, y la igualdad de densidad de panículas a partir de 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup> se explicaría por los altos niveles de heterogeneidad que impidieron la separación de medias estadística. Estas relaciones, junto con la falta de linealidad en la respuesta del rendimiento al NGM2 podrían indicar la escasez de recursos como factor limitante de este año, provocada por el deficiente estado del cultivo.





**Fig. 62 Relación entre las densidades de planta y panículas (a) y entre densidad de planta-y tamaño panículas (b) en 2007 hasta 2009. NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>)**

El peso de mil granos (PMG) intervino en el rendimiento en 2007 y 2009, mientras que en 2008 no hubo variación de este parámetro en las diferentes densidades de planta.

El menor rendimiento obtenido en 2007 a 60 kg semilla x ha<sup>-1</sup> indicó que en esta densidad de planta (54 plantas x m<sup>-2</sup>) la captación de recursos no alcanzó al nivel óptimo por una limitación de la propia capacidad sumidero, pues aun con una mayor producción de tallos no se pudo alcanzar ni la densidad ni el tamaño de panículas necesario para igualar los otros rendimientos.

Seguidamente se relacionó el rendimiento y sus componentes con las variables de dinámica del ahijamiento (el número máximo de tallos y la eficiencia) (Tabla 49). Los resultados indicaron una correlación negativa muy cercana a la unidad entre el número máximo de tallos y la eficiencia del ahijamiento ( $r=-0.91$ ,  $p<0.001$ ), coincidiendo con resultados previos en arroz (Samonte, *et al.*, 2006) y también en cebada (del Moral y del Moral, 1995). Ninguno de los dos parámetros mostró relación directa con el rendimiento, al contrario de lo sucedido en el experimento 2 con dosis de siembra entre 160 y 210 kg. semilla

x ha<sup>-1</sup>. A partir del estadio de máximo ahijado, empezaron a establecerse relaciones compensatorias entre las diferentes variables hasta el momento del llenado de los granos. El mayor número de tallos implicó una mayor densidad de panículas que fue posteriormente compensado con el tamaño de la panícula. Con todo ello, la eficiencia se relacionó negativamente con el NMT y por consiguiente, con la densidad de plantas y de panícula, pero sin repercutir en el rendimiento. El comportamiento observado en este experimento indicó que las respuestas del ahijamiento a la densidad de planta están asociadas a la competencia entre las plantas (condicionando el crecimiento vegetativo) y la captación de recursos (determinando también la supervivencia de los tallos).

**Tabla 49 Matriz de correlación con los coeficientes de Pearson (r) entre el rendimiento, los componentes del rendimiento, la capacidad sumidero (NGM2) y la dinámica poblacional del ahijado en los años 2007 hasta 2009.**

	DPL	R	NP	NGP	PMG	NGM 2	NMT	Ef
DPL	1.00							
R	0.49	1.00						
NP	0.79	0.32	1.00					
NGP	-0.74**	-0.06	-0.62*	1.00				
PMG	0.32	-0.12	-0.001	-0.59*	1.00			
NGM2	-0.19	0.25	0.14	0.69*	-0.73**	1.00		
NMT	0.94***	0.37	0.90***	-0.76**	0.31	-0.12	1.00	
Eficiencia	-0.83**	-0.09	-0.77**	0.85***	-0.35	0.37	-0.91***	1.00

DPL: Plantas x m<sup>-2</sup>; R: rendimiento; NP: número de panículas x m<sup>-2</sup>;NGP: número granos por panícula; PMG: peso mil granos; NGM2: número de granos por m<sup>2</sup>; NMT: número máximo de tallos x m<sup>-2</sup>; Ef: eficiencia (%);].  
\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

Con todo ello, se concluye que el arroz es un cultivo con una gran capacidad plástica de adaptación a las diferentes densidades de planta. En el inicio del ahijado ya se producen fenómenos compensatorios a través de la producción o senescencia de los tallos que se traducen en una gran estabilidad en el número final de panículas alrededor de las 400 y 450 panículas por m<sup>2</sup>. A partir de este momento, continúan las compensaciones a través del tamaño de la panícula aunque de manera más tenue, pues el llenado de granos que determina el PMG se mostró más estable, con valores superiores al 90%. Por todo esto, el rendimiento no mostró diferencias significativas a partir de dosis de siembra de 80 kg semilla x ha<sup>-1</sup>. La eficiencia del ahijado, cuya relación con el NMT fue inversa, no mostró influencia en el rendimiento aunque fue destacable la superioridad de las medias de producción en 160 Kg semilla x ha<sup>-1</sup> en 2008 y 2009. En sorgo, Lafarge, *et al.* (2002) obtuvo la menor eficiencia en mayores densidades de planta y fue relacionada con el rendimiento, significando que había una pérdida neta de asimilados durante la mortalidad de los tallos aun con cierto reaprovechamiento (Lauer y Simmons, 1988). En nuestro estudio, la falta de correlación significativa entre el rendimiento y la eficiencia podría llevar a la conclusión de que sí hay un aprovechamiento de los asimilados fijados por los tallos senescentes, como ya se percibió al comparar los datos de 2008 y 2009 sobre la eficiencia y el rendimiento.

#### **3.3.4.3 Manejo de agua y fertilización nitrogenada**

En 2007 y 2008, los análisis estadísticos indicaron que no se produjo interacción entre la dosis de siembra y los otros dos factores: manejo de agua y

fertilización nitrogenada. Por consiguiente, la dosis de siembra no se consideró en este apartado y los datos corresponden a la media de los dos tratamientos de dosis de siembra (160 y 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>). La falta de interacción del factor dosis de siembra durante estos dos años motivó la decisión de excluirse del diseño experimental en 2009. En el caso de la fertilización y el sistema de riego, aunque no siempre hubo interacción, en algunos casos se consideró interesante aportar los resultados de la combinación de los dos niveles de los dos factores.

El comportamiento del ahijado en las microparcels señaló una interacción entre el manejo de agua y la fertilización nitrogenada y de forma significativa en 2007 donde las diferencias entre tratamientos fueron más acusadas. Además, este año los daños ocasionados por la aplicación herbicida interactuaron con el manejo de agua, provocando una menor densidad de planta, aunque no de forma significativa, en las parcelas con lámina continua (Tabla 50). En condiciones de lento establecimiento del cultivo, el manejo de agua puede ser un factor clave durante esta fase: la lámina continua dificulta todavía más la fijación y el correcto crecimiento de la planta. Estos efectos provocaron un menor establecimiento de plántula en las microparcels y consecuentemente, una disminución en la densidad de planta. Las dimensiones de las unidades experimentales ocasionaron que se advirtiera esta diferencia en el número de plantas en las microparcels y que no se detectaran en la subparcela. Estas circunstancias dificultarán la interpretación de los resultados en los tratamientos de manejo de agua y su interacción con la fertilización nitrogenada.

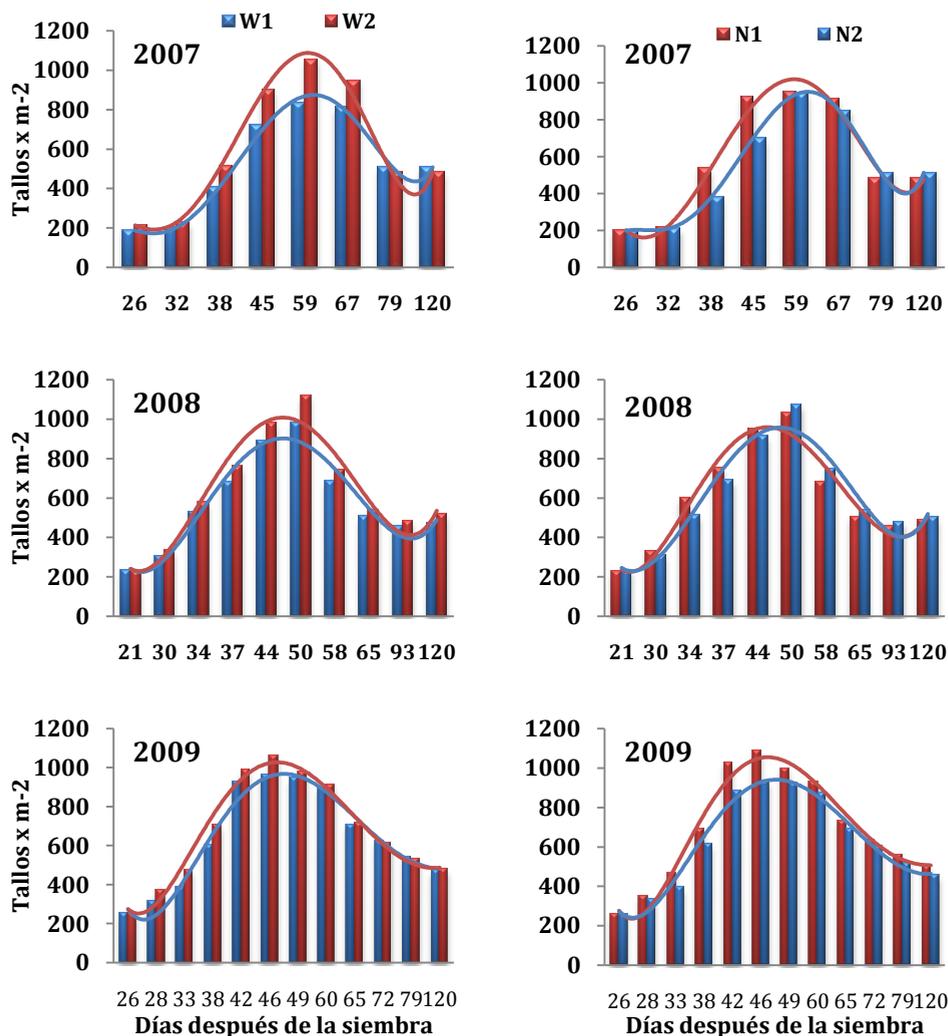
**Tabla 50 Densidades de planta (planta x m<sup>2</sup>) en las microparcels de dinámica del ahijamiento en los tratamientos de manejo de agua y en la combinación entre manejo de agua y fertilización nitrogenada.**

Tratamiento	2007	2008	2009
W1	187±58.9	233±38.5	254
W2	215±67.5	231±35.9	254
W1N2	203±67.0	233±40.4	254
W1N1	171±47.5	234±40.4	254
W2N2	193±71.9	238±31.7	254
W2N1	237±58.9	225±41.9	254

[W1: lámina continua de 7 cm; W2: riego intermitente a 3 cm; N1: fertilización nitrogenada precoz (estadio 3.5 hojas); N2: fertilización nitrogenada tardía (estadio 8.5 hojas)]

Teniendo en cuenta estas interferencias entre los factores, se analizaron los datos considerando los factores manejo de agua y fertilización nitrogenada por separado, en primer lugar y en segundo, sus diferentes combinaciones.

En los tres años de estudio, se observó cómo la fertilización al inicio del ahijado (N1) así como el riego intermitente (W2) estimularon el ahijado (Fig. 63), aunque la magnitud de la respuesta del cultivo fue variable en los diferentes años. En 2007, se advirtieron las diferencias más acentuadas entre tratamientos, debido a las peores condiciones del cultivo y al mayor número de plantas en el caso del manejo de agua, tal y como se ha explicado anteriormente.



A

B

**Fig. 63 Influencia del manejo del manejo de agua (A) y de la fertilización nitrogenada (B) en la dinámica poblacional del ahijado en 2007, 2008 y 2009.** [W1: lámina continua de 7 cm; W2: riego intermitente a 3 cm; N1: fertilización nitrogenada precoz (estadio 3.5 hojas); N2: fertilización nitrogenada tardía (estadio 8.5 hojas)]

La mayor producción de tallos promovida por el riego intermitente y la fertilización precoz permitió alcanzar un mayor número máximo de tallos

(NMT), con diferencias significativas entre los dos manejos de agua en 2007 (Tabla 51). Sin embargo, esta significación probablemente fue debida al mayor número de plantas. El estímulo del crecimiento vegetativo con una aplicación temprana de nitrógeno también ha sido descrito por otros autores en arroz (Pham Quang, *et al.*, 2004a) y maíz (Mundstock y Bredemeier, 2002). En 2008, no se observó respuesta en el ahijamiento entre los dos tratamientos de abonado e incluso la media se mostró ligeramente superior en N2.

**Tabla 51 Número máximo de tallos (NMT) y panículas (NP) por m<sup>2</sup> en los tratamientos de manejo de agua y fertilización nitrogenada en 2007, 2008 y 2009.**

Manejo de agua				
	W1		W2	
	NMT	NP	NMT	NP
2007	1007.9±263	509.3±87	1107.1±248*	484.1±90
2008	1039.0±185	474.2±58	1123.7±195	517.9±61
2009	1079.4±193	473.5±58	1108.7±175	477.5±94

Fertilización nitrogenada				
	N1		N2	
	NMT	NP	NMT	NP
2007	1007.9±262	481.5±62	955.7±185	511.9±108
2008	1039.0±185	490.7±59	1072.75±172	501.3±68
2009	1108.7±175	497.4±90	960.3±78	453.7±56

Acrónimos y unidades: NMT (número máximo de tallos x m<sup>-2</sup>); NP (número de panículas x m<sup>-2</sup>); W1 (lámina continua de 7 cm); W2 (riego intermitente a 3 cm); N1 (fertilización nitrogenada precoz, estadio 3.5 hojas); N2 (fertilización nitrogenada tardía, estadio 8.5 hojas)

\* Diferencias significativas dentro del mismo año y factor estudiado (LSD, p<0.05).

En 2007 y 2008, las diferencias se empezaron a manifestar a partir de los 35 DDS tanto en el caso del factor nitrógeno (2007) como en agua (2007 y 2008),

para posteriormente igualarse a partir de los 70 DDS, aproximadamente. En cambio, en 2009 la respuesta del cultivo se detectó antes, debido al establecimiento más rápido del cultivo, permitiendo una capacidad de respuesta más prematura.

Finalmente, la densidad de panículas se igualó en todos los tratamientos aunque W2 mostraba una cierta influencia positiva mientras que N1 mostró medias ligeramente inferiores que N2. Los valores de las medias globales anuales fueron:  $496.69 \pm 87.78$ ,  $496.03 \pm 63.10$  y  $475.53 \pm 75.17$  panículas x m<sup>-2</sup>, en 2007, 2008 y 2009, respectivamente.

**Tabla 52 Eficiencia del ahijado (%) en los tratamientos de manejo de agua y fertilización nitrogenada en 2007, 2008 y 2009.**

Año	Manejo agua		Fertilización nitrogenada	
	W1	W2	N1	N2
2007	59.8±10.28*	44.9±8.53	54.8±13.3	50.0±10.53
2008	48.1±3.55	46.7±6.2	47.0±3.10	47.9±6.50
2009	48.0±5.40	44.3±4.86	47.3±5.30	45.0±5.44

\* Diferencias significativas dentro del mismo año y factor estudiado (LSD, p<0.05).

En la tabla 52 se exponen los resultados referentes a la eficiencia del ahijado. En los tres años, la eficiencia fue superior en los tratamientos W1 debido a la menor densidad de tallos alcanzada en la fase de máximo ahijado que permitió un menor grado de competitividad entre los tallos favoreciendo de esta manera su supervivencia. Una vez más, hay que considerar la interacción entre el herbicida y el manejo de agua, acentuando las diferencias entre el manejo de agua en 2007. Siguió el mismo comportamiento el efecto de la fertilización

nitrogenada. El abonado precoz mejoró la eficiencia del ahijado en 2007 y 2009, cuando previamente se había alcanzado un mayor NMT.

En resumen, los resultados indicaron que tanto el riego intermitente superficial como la fertilización precoz en el ahijado estimulan la producción de tallos permitiendo alcanzar un mayor número máximo de tallos. Los procesos de senescencia compensaron esta superioridad de tallos equiparando al final el número de panículas en todos los tratamientos con valores entorno las 480 panículas x m<sup>-2</sup> en dosis de siembra entre 160 y 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>. Cuando el cultivo tuvo buenas fases de germinación y de establecimiento, la diferenciación entre tratamientos de agua podría detectarse antes, indicando una capacidad de respuesta más prematura.

Seguidamente se muestran los valores obtenidos para el rendimiento y los componentes del rendimiento. Los análisis estadísticos no detectaron interacción significativa entre el manejo de agua y la fertilización nitrogenada, por lo que se tratan de forma separada.

La tabla 53 muestra el mayor rendimiento obtenido en 2008 y 2009 en riego intermitente a 3 cm (W2) respecto lámina continua a 7 cm (W1) si bien no fue significativo. Además, esta superioridad fue consistente pues se mantuvo en dos de las tres repeticiones en los dos años. En cambio, en 2007 no hubo diferencias entre los dos manejos de agua probablemente por interferencia del efecto del herbicida.

**Tabla 53 Rendimiento, componentes del rendimiento y sumidero.**

Año		DPL	R	NP	NGP	PMG	NGM2
2007	W1	123,4±64.0	7814±73.0	4624±58.1	664±12.1	34.0±1.1	30546.5±6304.5
	W2	1306±62.3	7710±72.2	4849±50.7	584±8.3	33.9±0.9	28575.6±4768.7
2008	W1	2044±58.9	9241±125.1	4742±58.9	60.1±5.1	35.3±0.6	28453±3986.7
	W2	226.9±67.5	9988±94.4	5179±61.8	59.4±3.6	35.5±0.5	30662±3121.7
2009	W1	254.0±0.0	10009±71.5	473.6±58.5	57.2±3.7	35.2±0.7	26935±1781.3
	W2	254.0±0.0	10055±70.0	477.5±94.9	59.0±8.6	35.5±0.3	27500±1622.1

Acrónimos y unidades: NMT (número máximo de tallos, tallos x m<sup>-2</sup>); NP (número de panículas x m<sup>-2</sup>), R: (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>), Eficiencia (%), NGM2 (número de granos por m<sup>2</sup>).

En todos los casos el mayor rendimiento coincidió con el mayor número de granos por m<sup>2</sup>. En 2008, la superioridad en el NGM2 (28453 y 30662 granos x m<sup>-2</sup> en W1 y W2, respectivamente) fue debida a la mayor densidad panícula que, a su vez, fue respuesta al mayor NMT (988.1 y 1123.7 en W1 y W2, respectivamente). En 2009, también se emitió un mayor NMT en W2 (1079.4) respecto W1 (989.4) pero la mortalidad igualó el NP (473.6 y 477.5 en W1 y W2, respectivamente), aminorando de esta manera las diferencias productivas entre ambos tratamientos. Estos resultados concuerdan en buena medida con los obtenidos por Lin, *et al.* (2005) que estudió el efecto del sistema de riego intermitente (SWD: *shallow water depth with wetting and drying*) en la fotosíntesis y el rendimiento en el cultivo del arroz. El sistema de riego intermitente fue comparado con el sistema de inundación continua y se obtuvieron rendimientos un 10% superior en SWD. En este estudio, se realizaron valoraciones sobre la tasa fotosintética, la conductancia estomatal y la concentración de nitrógeno foliar y observaron que los dos primeros se correlacionaron positivamente con el tercero. Concluyeron, por lo tanto, que el

efecto de SWD sobre el rendimiento se producía a través de la concentración de N en la hoja. Por otro lado, la relación de SWD con el rendimiento y los componentes consistió en un aumento de la capacidad sumidero (NGM2) a través del aumento de la densidad y tamaño de la panícula.

**Tabla 54 Influencia del momento de la fertilización nitrogenada en el estadio del ahijado sobre el rendimiento en los años 2007 hasta 2008.**

		DPL	R	NP	NGP	PMG	NGM2
2007	N1	129.6±63.4	786.6±53.8	474.8±47.9	62.4±11.9	34.1±1.2	29689.7±6606.0
	N2	124.4±63.0	765.7±86.5	472.5±62.6	62.7±10.4	33.7±0.8	29489.5±4549.2
2008	N1	220.2±68.7	943.4±112.4	490.7±59.4	59.3±3.6	35.4±0.5	29045.8±3714.4
	N2	211.0±59.4	979.6±119.4	501.3±68.8	60.3±4.8	35.4±0.6	30069.5±3808.9
2009	N1	254.0±0.0	1000.2±58.6	497.4±90.3	56.0±7.5	35.3±0.7	27255.8±1485.8
	N2	254.0±0.0	1006.3±81.0	453.7±56.0	60.3±4.6	35.6±0.5	27180.6±1945.5

Acrónimos y unidades: NMT (número máximo de tallos, tallos x m<sup>-2</sup>); NP (número de panículas x m<sup>-2</sup>), R: (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>), Eficiencia (%), NGM2 (número de granos por m<sup>2</sup>).

Los resultados expuestos en la tabla 54 indican la ausencia de respuesta del rendimiento a al momento de fertilización en ahijado ya que no se detectaron diferencias significativas en las medias ni una tendencia de los valores a favor de ningún tratamiento. Estos resultados discrepan en cierta medida de los obtenidos a nivel de planta donde en 2008 y 2009 los rendimientos en N1 fueron superiores aunque no significativamente. La superioridad en el NMT y

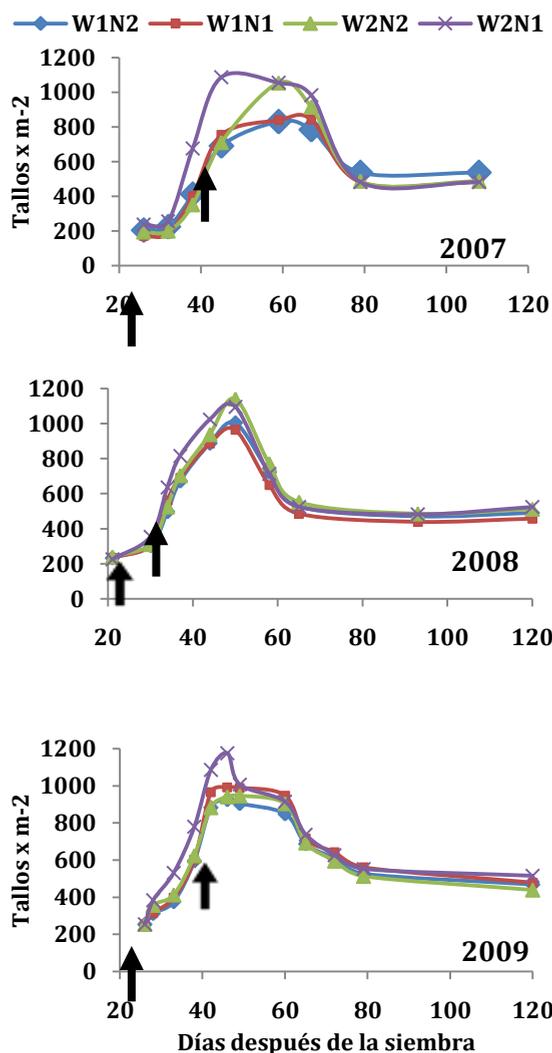
NP en 2009 no repercute en el rendimiento debido a la compensación mediante el tamaño de la panícula. En 2007, el mayor NMT ya quedó compensado con la igualdad de densidad de panículas a través de procesos de senescencia. Por consiguiente, reiteradamente se observó como los efectos compensatorios contrarrestaron los efectos de un mayor ahijamiento mediante la mortalidad de los tallos igualando la densidad de panículas y, cuando no fue suficiente, a través del número de granos por panícula.

Los resultados obtenidos en los tres años sobre la dinámica del ahijamiento y el rendimiento junto con sus interrelaciones indicaron que el manejo de agua intermitente, a través de su papel en el fomento del ahijamiento y del subsiguiente mayor NP, permite mejorar el rendimiento del cultivo. Sin embargo, cuando el establecimiento del cultivo tiene lugar en condiciones óptimas, esto es, un establecimiento rápido y un desarrollo precoz, la influencia del manejo del agua en el estímulo del ahijamiento disminuye puesto que la capacidad de ahijamiento, determinada por el número de yemas por planta, ya está próxima al total desarrollo de las yemas. Además, en estas circunstancias hay que tener en cuenta los efectos compensatorios del ahijamiento que tendrán lugar después de alcanzar la fase de máximo ahijado y que provocarán elevados índices de mortalidad de los tallos. Por otro lado, se plantea la situación opuesta en la que el establecimiento del cultivo se desarrolla con dificultades, en este caso por efectos de la aplicación herbicida. En estas circunstancias, promover el ahijado precoz puede repercutir negativamente en el rendimiento por favorecer el desarrollo de tallos con baja disponibilidad de recursos debido al mal estado de la hoja sustentadora. Esta peor condición trascenderá a la fase reproductiva y de maduración, con un menor tamaño de las panículas y un llenado deficiente de los granos. Por consiguiente, el manejo

de agua se convierte en un instrumento útil capaz de regular el ahijamiento en función de las necesidades concretas del cultivo.

En cuanto a la fertilización nitrogenada, los mismos efectos compensatorios tienen lugar para regular el mayor número de tallos obtenidos con un abonado precoz en el estadio del ahijado.

Finalmente, se exponen los resultados obtenidos en los tratamientos resultantes de la combinación entre manejo de agua y fertilización nitrogenada (Fig. 64). La combinación W2N1 (riego intermitente a 3 cm y fertilización al estadio 3.5 hojas) resultó la más favorecedora para una producción de tallos superior y precoz, con un comportamiento diferenciado ya desde los primeros estadios del ahijado. Los efectos del tratamiento en 2008 se observaron con cierto retraso respecto los otros años, aproximadamente a los 40 DDS. En cuanto al tratamiento W2N2 (riego intermitente y fertilización a las 8.5 hojas), la respuesta del cultivo produciendo tallos no tuvo lugar hasta que no se abonó, alrededor de los 40 DDS. En 2009, no se observó dicha respuesta y el tratamiento W2N2 se comportó de igual forma que los otros dos tratamientos con lámina continua de agua (W1).



**Fig. 64 Dinámica poblacional del ahijado en 2007, 2008 y 2009.** Las flechas indican los dos momentos de aplicación del fertilizante nitrogenado en ahijado según el tratamiento (N1 en 21, 24 y 19 DDS y N2 en 48, 41 y 39 DDS en 2007, 2008 y 2009, respectivamente)

La dinámica poblacional del ahijado observada en los tres años indicó la diferencia entre la presencia y disponibilidad de nutrientes, especialmente

patente a principios del desarrollo. En el caso de riego intermitente superficial y fertilización temprana (W2N1) ambas propiedades coexistieron en el tiempo: los nutrientes estuvieron presentes, al mismo tiempo que hubo disponibilidad para su captación y uso por un mejor desarrollo foliar. En cambio, en riego intermitente y fertilización tardía (W2N2) la falta de aportación de nutrientes limitó el ahijamiento prematuro del cultivo a pesar de la buena disponibilidad de la planta. En lámina continua (W1), el lento desarrollo de la plántula impidió una correcta captación del nitrógeno por lo que la producción anticipada de tallos no pudo realizarse, independientemente de la aportación de nitrógeno mineral.

En 2007, la mayor densidad de planta en riego intermitente y fertilización precoz (W2N1) acentuó las diferencias en los tratamientos, además de provocar un adelanto en la fecha del máximo ahijado de 14 días. Además, en este año hay también que considerar los efectos del herbicida, que también alcanzaron las microparcels.

Cuando se compararon estos resultados con los aportados por las plantas de monitorización en el marco de seguimiento del ahijamiento en planta (Sección 3.2.3.3) se pusieron de manifiesto ciertas discrepancias en los resultados. La más importante se mostró en 2007, donde los resultados en el marco de seguimiento indicaron un estímulo del ahijamiento en riego con lámina continua (W1), mientras que en las microparcels la situación fue la contraria. El origen de la discordancia residió en la interferencia del factor densidad de planta en las microparcels que fue ligeramente superior en riego intermitente superficial y fertilización precoz (Tabla 55), incrementando la densidad de tallos por unidad de superficie. La segunda discrepancia se produce en el

tratamiento de riego intermitente y fertilización tardía (W2N2) en los años 2007 y 2008, donde según las plantas marcadas, estas condiciones limitan el ahijamiento de la planta mientras que en la microparcela muestran una producción de tallos superior a riego con lámina permanente. Se analizó la dinámica del ahijado en planta en las microparcels y se comprobó que seguían el mismo comportamiento que por unidad de superficie, por lo que se descartaron efectos de la densidad de planta. La repetición de los mismos resultados en dos años consecutivos en las respectivas unidades experimentales también permitió rechazar errores en las valoraciones ocasionadas por los evaluadores. Por consiguiente, se aludió a un posible efecto ambiental generado en las microparcels que subsanó las posibles condiciones de estrés provocadas por el tratamiento W2N2. Se concluye, en consecuencia, que las condiciones provocadas por la combinación riego intermitente superficial y fertilización tardía en el ahijado son susceptibles de restringir la capacidad de ahijado de la planta, si bien estos efectos pueden no ser siempre presentes y/o mostrar variaciones en su intensidad.

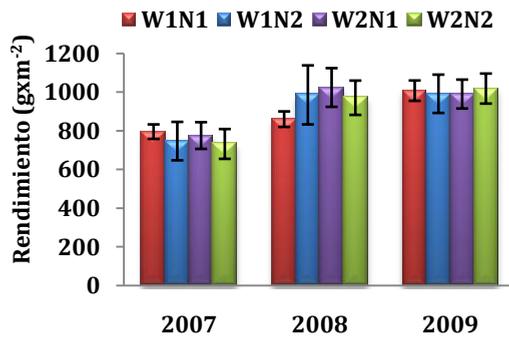
**Tabla 55 Rendimiento y componentes del rendimiento en los tratamientos combinatorios entre el manejo de agua y la fertilización nitrogenada en 2007 hasta 2009.**

		2007	2008	2009
<b>DPL</b>	W1N1	171±47.5	234±40.4	254±0.0
	W1N2	203±67.0	233±40.4	254±0.0
	W2N1	237±58.9	225±41.9	254±0.0
	W2N2	193±71.9	238±31.7	254±0.0
<b>R</b>	W1N1	796.8±37.6	861.3±40.2	1009.0±52.6
	W1N2	748.0±99.5	987.0±152.8	992.8±99.1
	W2N1	776.8±69.1	1025.4±100.1	991.4±74.8
	W2N2	733.2±77.2	972.3±88.7	1019.7±77.8

		2007	2008	2009
<b>NP</b>	W1N1	468.8±44.0	421.3±36.0	478.8±66.6
	W1N2	450.7±72.5	451.8±68.0	468.3±63.5
	W2N1	492.8±52.9	482.2±55.3	515.9±122.2
	W2N2	498.6±51.9	471.3±63.2	439.2±56.3
<b>NGP</b>	W1N1	65.1±13.0	58.0±3.4	56.6±6.2
	W1N2	72.3±12.0	62.3±5.8	57.8±2.4
	W2N1	59.2±10.3	60.5±3.6	55.2±13.7
	W2N2	57.4±6.0	58.2±2.7	62.8±5.0
<b>NGM2</b>	W1N1	30806.4±7676.3	26453.1±1485.9	26911.1±1425.7
	W1N2	32130.8±5091.8	30453.4±4812.2	26959.9±2428.6
	W2N1	29129.0±5579.1	31638.5±3465.9	27600.5±1769.2
	W2N2	28667.8±4087.7	29685.6±2899.4	27401.3±1848.8

Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); R (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>); NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); NGM2(número granos x m<sup>-2</sup>).

El efecto más claro ejercido sobre la evolución del número de tallos y que se repitió en los tres años fue el obtenido por la combinación riego intermitente y fertilización temprana, (W2N1) promoviendo la producción de tallos hasta alcanzar un mayor número máximo de tallos. El mayor NMT obtenido repercutió positivamente en la densidad de panículas (Tabla 55) pero sin significación entre los tratamientos. Tampoco tuvo efecto sobre el rendimiento, pues sólo en 2008 la media fue superior y no significativamente en este tratamiento (Fig. 65).



**Fig. 65 Rendimientos obtenidos en los diferentes tratamientos de manejo de agua y fertilización nitrogenada en 2007 hasta 2009.**

### 3.4 CONTROL DEL AHIJAMIENTO A TRAVÉS DEL MANEJO DE AGUA

En diversos estudios se ha descrito la repercusión negativa en el rendimiento de un crecimiento vegetativo excesivo (Shahidullah, *et al.*, 2009) por representar una pérdida de asimilados a través de la senescencia de los tallos (Lauer y Simmons, 1988), porque disminuye la concentración de nitrógeno foliar (Won, *et al.*, 1999a) y por la pérdida de carbono por el mantenimiento de la respiración (Bueno y Lafarge, 2009). Por otro lado, otros trabajos concluyen que favorecer el ahijado precoz y localizado en los nudos inferiores favorece el rendimiento del cultivo a través de la formación de la cubierta vegetal más temprana, permitiendo una mayor y rápida acumulación de asimilados que repercutirá en la productividad del cultivo (Lafarge, *et al.*, 2004b). El experimento 2 de la presente Tesis sobre la influencia del manejo de agua y la fertilización nitrogenada en el ahijado en dos dosis de siembra, en la sección acerca de la dinámica, se determina que ambos factores inciden en la precocidad y en la localización del ahijado. Efectivamente, un riego intermitente superficial junto con una fertilización a principios del estadio, inciden en el desarrollo de yemas en los nudos inferiores y en el aumento de la producción de tallos consiguiendo un mayor número máximo de tallos. Asimismo, en este mismo experimento se observa la correlación positiva entre el NMT y el rendimiento a través de la densidad de panículas. Sin embargo, esta sobreproducción vegetativa es posteriormente aminorada por procesos de senescencia y por la regulación de los componentes del rendimiento durante las fases reproductiva y la maduración. Al final, se reduce el potencial productivo creado mediante el estímulo del ahijado precoz. Por consiguiente, se considera que reduciendo los fenómenos de compensación se pueden mantener las ventajas del ahijado precoz hasta la maduración y así, conseguir mejoras

más claras y consistentes en el rendimiento. La estrategia consiste en limitar el ahijado improductivo para evitar el crecimiento vegetativo excesivo, reducir posteriores procesos de mortalidad de los tallos y promover la productividad de los supervivientes mediante la reducción de la competitividad dentro y entre las plantas. Asimismo, se analizan los procesos que desencadenan la reducción del ahijado y sus efectos sobre el posterior desarrollo del cultivo desde fase del máximo ahijado y hasta la maduración.

Se estudian dos técnicas de manejo de agua que previsiblemente ejercen control sobre el ahijamiento improductivo mediante la suspensión del proceso y se comparan con un tratamiento testigo (TES). La primera de ellas consiste en un aumento de la lámina (ALM) hasta 1 ó 2 cm por encima de la aurícula de la última hoja desarrollada. Su efecto se basa en el debilitamiento de las yemas en las axilas de las hojas (Yoshida, 1981) y, consecuentemente, se impide el desarrollo de estas y la subsecuente producción de tallos. Una técnica parecida tiene lugar en algunas regiones de Japón (Ishibashi, *et al.*, 2009), donde se aumenta el nivel de agua gradualmente hasta los 25 cm desde mediados de junio hasta finales de agosto para posteriormente rebajarse hasta 5 cm. En este caso, el objetivo no solamente es la mejora en la productividad sino que también el almacenaje de agua. La segunda técnica estudiada consiste en el drenaje de las parcelas (DR) cuya práctica tiene lugar también en zonas arroceras japonesas (Wang, *et al.*, 2007), en el estado de Santa Caterina de Brasil (Sangoi, *et al.*, 2008b) y en los arrozales de la Comunidad Valenciana con diferentes fines: mejorar el desarrollo de las raíces, interrumpir el ahijamiento improductivo y prevenir el pudrimiento de las raíces (Horie, *et al.*, 2005).

Además, se estudia la interacción de la densidad de planta sobre estos manejos de agua utilizando dos dosis de siembra: 160 y 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>.

Dado que el objetivo es impedir la emergencia de tallos de baja o nula productividad, se remite a los resultados sobre la dinámica del ahijado en planta y productividad de los tallos para saber en qué posiciones se desarrollaban estos tallos y, por lo tanto, cuando aplicar estas prácticas. La necesidad de esta información hace que este experimento no se inicie hasta 2008, cuando se dispone de, al menos, un año de resultados. Los resultados de 2007, posteriormente reafirmados por los obtenidos en 2008, indican que el ahijado improductivo tiene lugar a partir de la sexta posición, señalando de esta manera el momento en que aplicar el manejo de agua correspondiente. Como se ha visto previamente en esta Tesis, la localización del ahijado improductivo varía en 2009, influenciando los resultados e indicando la importancia del seguimiento del ahijado y del estado del cultivo para la determinación del momento de aplicación de estas prácticas.

Las dos técnicas se aplican hasta alcanzar el estadio de inicio de panícula.

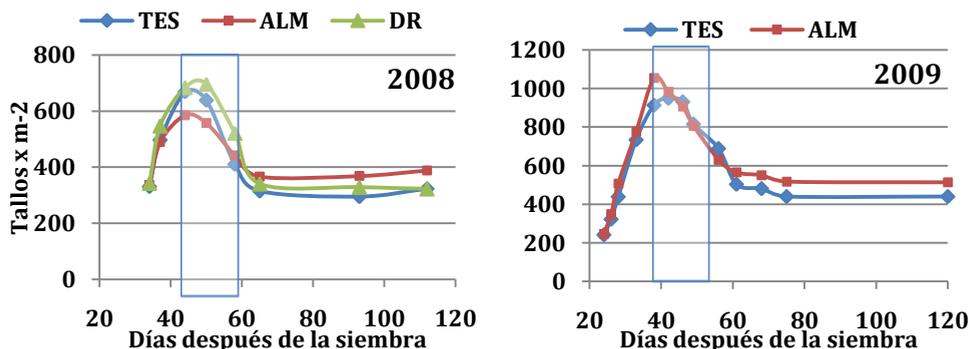
Los objetivos de este experimento fueron, en primer lugar, comprobar si el aumento de la lámina de agua o el drenaje permite interrumpir el ahijado y en segundo lugar, evaluar el impacto de la aplicación de estas técnicas en la eficiencia del ahijado y en el rendimiento del cultivo.

### **3.4.1 Efectos del control del ahijamiento sobre la dinámica poblacional y su relación con el rendimiento.**

#### **3.4.1.1 Evaluación del método para el control ahijamiento y su influencia sobre la dinámica poblacional.**

Los datos para el estudio de la dinámica poblacional se obtuvieron de las microparcels situadas en dos (2008) y tres (2009) repeticiones del experimento. Por tanto, se muestran los resultados sobre el efecto de un aumento de la lámina (ALM) de agua (años 2008 y 2009) y de drenaje (DR) de las parcelas (año 2008) en la evolución de la densidad de tallos (Fig. 66), la densidad final de panículas y porcentaje de tallos productivos. Además se incluyó el factor dosis de siembra con dos niveles: 160 y 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>.

El análisis estadístico de la evolución del número de tallos no detectó significación ni interacción entre las dos dosis de siembra y los tratamientos ni en el efecto de la dosis de siembra, por lo que los datos presentados corresponden a la media de las dos dosis.



**Fig. 66 Dinámica de la población de tallos. (TES: testigo; ALM: aumento lámina; DR: Drenaje).** Los gráficos se presentan en escalas diferentes en las ordenadas para poder apreciar mejor las diferencias en las densidades de los tallos. El rectángulo indica el periodo de aplicación del tratamiento: 43-60 DDS y 39-52 DDS en 2008 y 2009, respectivamente.

Siguiendo los resultados sobre el ahijamiento improductivo obtenidos en el experimento 2 (ver introducción de esta misma sección), los diferentes manejos de agua se aplicaron después de la emergencia del tallo 5 (T5), a los 43 y 39 días después de la siembra (DDS) en 2008 y 2009, respectivamente. Concretamente, en 2008 y 2009 las emergencias de T5 y T6 tuvieron lugar a los 36 y 41 DDS, respectivamente; de modo que en 2008 se iniciaron los tratamientos después de la emergencia de T6 y en 2009, después de T5. El aumento de la lámina de agua (ALM) consistió en el aumento de la profundidad hasta 1 ó 2 cm por encima de la aurícula de la última hoja desarrollada (Won, *et al.*, 1999a) si bien las condiciones del suelo sólo permitieron alcanzar una profundidad de 12 cm y no se alcanzó el nivel pretendido.

La aplicación de los tratamientos duró 15 días, hasta alcanzar el de inicio de panícula, a los 60 y 52 DDS en 2008 y 2009, respectivamente. Se marcó como momento límite el inicio de panícula por prevención de problemas en el

rendimiento asociados a un estrés hídrico durante esta fase (Zeng *et al.*, 2001) en el tratamiento de drenaje.

El primer efecto observado del aumento de lámina fue sobre el número máximo de tallos por m<sup>2</sup> (NMT) (Fig.66). En 2008, el NMT fue inferior en ALM (617.0±233.0 tallos x m<sup>-2</sup>) que en el resto de los tratamientos (668.7±138.9, 720.2±170.0 en TES y DR, respectivamente), aunque no significativamente, señalando el cese del ahijado mediante este manejo de agua. En 2009, contrariamente, el NMT fue superior en ALM (1095.2±114.1) que en el testigo (978.8±56.7). Este año se dio la circunstancia que en las microparcelas ya había una menor densidad de tallos en el testigo antes de empezar los tratamientos. Ningún tratamiento tuvo lugar antes de la aplicación del control del ahijamiento, por lo que se ignoran los motivos de esta diferenciación. Esta situación condicionó los posibles resultados que se podrían haber obtenido en cuanto a la densidad máxima de tallos. Por otro lado, en 2009 la fase de máximo ahijado en la planta tuvo lugar antes (38 DDS) que en los años anteriores (48, 50 y 59 DDS en 2006, 2007 y 2008, respectivamente), por lo que no se pudo ejercer efecto sobre este estadio porque quizás ya se había alcanzado, aunque a nivel de cultivo esta fase se alcanza con cierto retraso. Por tanto, en 2009 el aumento de lámina para interrumpir el ahijamiento se realizó más tarde de lo que se pretendía debido al desarrollo precoz de las plantas respecto los años anteriores. Este suceso sugiere que para decidir el momento de interrupción del ahijamiento no sólo debe considerarse la posición del tallo a partir de la cual se pretende evitar la emergencia, sino que también el estado de desarrollo de la planta. Por otro lado, cuando se analizaron los resultados en valores relativos (Tabla 56), se observó un descenso del 7% del número de tallos en ALM 4 días después del inicio del tratamiento, mientras que en el TES continuó

subiendo un 4%. Por tanto, en números relativos sí podría haber tenido lugar la intervención en el ahijamiento por el ALM pero no de forma clara, puesto que también se podía explicar por el descenso propio después de la fase de máximo ahijado.

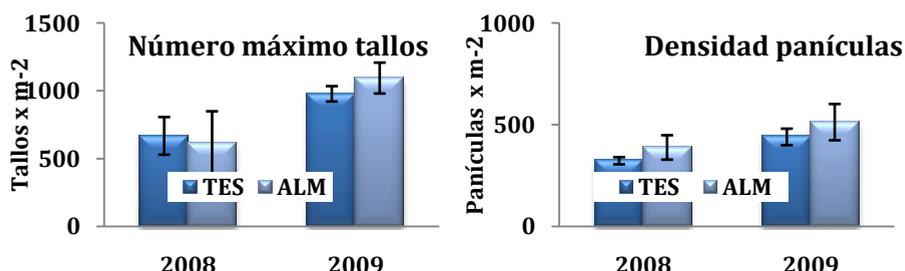
**Tabla 56. Número de tallos (NT) a los 38 y 42 DDS y porcentaje de incremento del número de tallos 3 días después del inicio del tratamiento en 2009.**

2009	NT 38	NT 42	% incremento
TES	914,0	949,7	3,9
ALM	1054,2	982,8	-6,8

El drenaje de los campos no funcionó como método de control tal y como muestra la figura 66 (año 2008) en la que se observa como la evolución del número de tallos siguió el mismo comportamiento que el testigo. Para el análisis de este comportamiento, hay que tener en cuenta que en los 15 días de duración del tratamiento no se consiguió un drenaje total de las parcelas, lo que implica que no se produjo el estrés hídrico que pudo haber reducido la producción de tallos (Sangoi, *et al.*, 2008a). Según Zhong, *et al.* (2003) la inhibición del ahijamiento mediante el drenaje tiene lugar por la reducción en la absorción de nitrógeno del suelo, por lo que la presencia de agua en los campos pudo haber impedido este efecto. La falta de respuesta en la producción de tallos ante la retirada de agua durante la fase vegetativa coincide con los resultados descritos por Sangoi, *et al.* (2008a) quien atribuyó este comportamiento a las lluvias que tuvieron lugar durante este periodo. Por consiguiente, no puede haber restricción del ahijamiento sin estrés hídrico

durante la fase vegetativa. Las dificultades que presenta este sistema en las parcelas experimentales y más aún en las productivas por sus mayores dimensiones, motivaron la decisión final de excluir al año siguiente esta tesis para el control del ahijamiento.

La densidad de panícula en 2008 fue superior en ALM ( $388.9 \pm 60.1$  panículas  $\times$   $m^{-2}$ ) que en TES ( $323.4 \pm 17.6$  panículas  $\times$   $m^{-2}$ ) y en DR ( $323.4 \pm 104.4$  panículas  $\times$   $m^{-2}$ ), aunque sin diferencias significativas entre ellos (Fig.67). La eficiencia del ahijado se mostró claramente superior en ALM en 2008 ( $66.6 \pm 14.2\%$ ) respecto los otros tratamientos ( $50.0 \pm 10.1$  y  $44.3 \pm 3.8\%$  en TES y DR, respectivamente) con una probabilidad cercana al nivel de significación del 5% ( $p=0.069$ ). En 2009, las diferencias en eficiencia entre tratamientos se redujeron ( $45.2 \pm 6.2$  y  $47.2 \pm 9.0\%$  en ALM y TES, respectivamente) muy probablemente debido al retraso en el inicio del tratamiento.



**Fig. 67 Influencia del control del ahijado a través del manejo de agua en el número máximo de tallos y la densidad de panículas en 2008 y 2009.** (TES: testigo; ALM: aumento lámina).

Por tanto, el aumento de la lámina de agua se confirma como método para la interrupción del ahijamiento y, por lo tanto, para impedir un excesivo crecimiento vegetativo. Diversos autores describieron el descenso del NMT tras el aumento de la lámina de agua (Won, *et al.*, 1999a; Won, *et al.*, 1999b; Ishibashi, *et al.*, 2009) seguido por un aumento de la eficiencia. También en el

estudio de Ao, *et al.* (2009) se describió el mismo comportamiento, aunque el control del ahijamiento se efectuó o bien mediante la extracción manual de los tallos o bien mediante el cultivo de las plantas de arroz en espuma de poliestireno que limitaba la capacidad de crecimiento de las plantas.

La reducción en el NMT podría haber reducido la competencia por los carbohidratos entre los diferentes tallos y por el N absorbido, aumentando el porcentaje de supervivencia de los tallos (Nuruzzaman, *et al.*, 2000). Además, con la reducción en el número de tallos se disminuyen los efectos de sombreo (Zhong, *et al.*, 2002) dentro de la misma planta y la competencia por la luz (Sparkes, *et al.*, 2006), favoreciendo también en este sentido la supervivencia. Este efecto puede haberse potenciado todavía más con una mayor concentración de N foliar dada su relación con el LAI crítico, que es el índice foliar a partir del cual empiezan procesos de mortalidad de los tallos (Zhong, *et al.*, 2002). La relación negativa entre el NMT y la supervivencia a través del N foliar también fue descrita por Pasuquin, *et al.*, 2008.

Por otro lado, la mejora en la eficiencia del ahijado observada en 2009 con ALM sin que este tratamiento haya afectado el NMT sugiere que este manejo de agua también permite aumentar la supervivencia de los tallos directamente, y no sólo a través de la reducción de competencia. Won, *et al.* (1999a) detectó un mayor porcentaje de N foliar en la hoja bandera en plantas sometidas a un aumento de la lámina de agua (hasta 25 cm) que en las cultivadas en condiciones estándar de riego (lámina continua de 2-3cm). Por consiguiente, la densidad de panículas no sólo depende del número de tallos (Wu, *et al.*, 1998) sino que también de las características fisiológicas de los tallos.

### 3.4.1.2 Influencia del control del ahijamiento sobre el rendimiento y los componentes del rendimiento

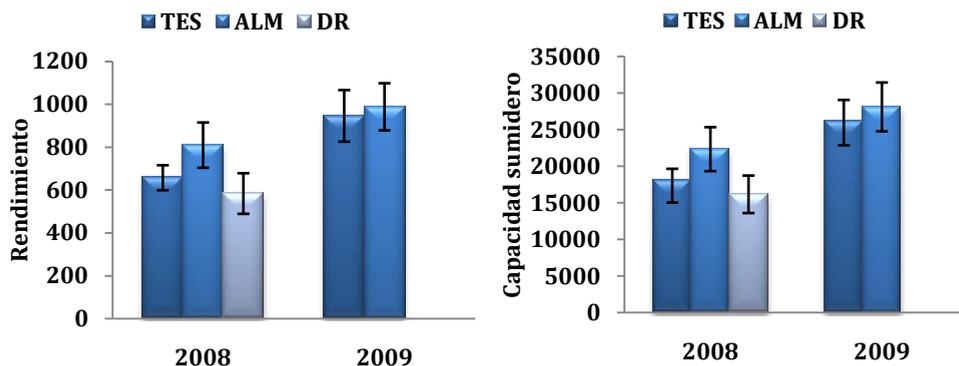
Los análisis estadísticos indicaron que no hubo interacción entre la dosis de siembra y los métodos de control del ahijado, por lo que se analizan los datos correspondientes a la media de las dos dosis.

**Tabla 57 Rendimiento y componentes del rendimiento en las microparcelas de dinámica poblacional del ahijamiento en los tratamientos testigo (TES), drenaje de los campos (DR) y aumento de la lámina (ALM).**

	2008			2009	
	TES	DR	ALM	TES	ALM
DPL	220.2±38.5	226.2±43.7	204.4±44.6	242.1±31.6	246.0±34.8
R	656.7±58.4	582.8±94.9	808.9±105.6	983.9±126.0	10180±1174
NP	323.4±17.6	323.4±104.4	388,9±60.1	440,5±40.7	513,2±89.3
NGP	55.8±2.6	52.1±10.0	58,3±10.4	59,7±6.4	55,5±6.7
FERT	92.8±2.3	93.5±2.0	94.8±1.7	98.2±0.0	97.9±0.0
PMG	36.4±0.2	36.0±1.0	36,2±0.5	36,7±1.2	35,9±0.6
NGM2	18050.5±1607	16174.1±2565	22344.1±3007	26204.5±286 8	28116.4±333 4

Unidades y acrónimos: DPL (Densidad de planta, plantas x m<sup>-2</sup>); R (rendimiento, g x m<sup>-2</sup>); NP (número panículas x m<sup>-2</sup>); NGP (número granos x panícula<sup>-1</sup>); FERT (fertilidad, % granos llenos);PMG (peso mil granos, g); NGM2(número granos x m<sup>-2</sup>).

En la tabla 57 se exponen los resultados obtenidos del rendimiento y los componentes del rendimiento en las microparcelas de cultivo en los años 2008 y 2009. Los dos años coincidieron en presentar mayores rendimientos en ALM respecto el TES y DR (en 2008) y de forma reiterada, pues en 4 de las 5 repeticiones acumuladas en los dos años se dio este resultado, aunque finalmente las diferencias no resultaron significativas (Fig. 68). Por lo tanto, se confirma el ALM como técnica de control del ahijamiento que permite mejorar el rendimiento del cultivo mediante la limitación del desarrollo de tallos improductivos.



**Fig. 68 Rendimientos (g x m<sup>-2</sup>) y capacidad sumidero (granos x m<sup>-2</sup>) obtenidos en los tratamientos testigo (TES), aumento de lámina (ALM) en 2008 y 2009 y drenaje (DR) en 2008.**

Se analizaron los resultados obtenidos del rendimiento y sus componentes, así como las relaciones establecidas entre estos parámetros y los relacionados con la dinámica del ahijado (Tabla 58). En los dos años, el mayor rendimiento obtenido se explicó por la mayor capacidad sumidero (NGM2) y ésta se relacionó de forma lineal con la densidad de panículas. La interrupción del ahijamiento permitió una mayor eficiencia que condujo a un aumento del 20 y 17% de la densidad de panículas en 2008 y 2009, respectivamente. Luego, los mayores rendimientos conseguidos en ALM fueron consecuencia de la superioridad en el número de panículas. Esta superioridad no se compensó con el tamaño de la panícula en 2008, mientras que sí lo estuvo en 2009, explicándose de esta manera las menores diferencias en el rendimiento de 2009 (3.5% respecto TES) respecto 2008 (23.1%). En 2008, la reducción del NMT podría haber comportado una mayor disponibilidad de N durante el estadio de inicio de panícula reduciendo la competencia por este elemento y resultando en un mayor tamaño de panícula, mientras que en 2009 si pudieron

haber mantenido relaciones competenciales intensas entre las panículas por el retraso de la técnica.

En 2008, el menor número máximo de tallos provocó efectos contrapuestos sobre la eficiencia del ahijado y la densidad de panículas, correlacionándose negativamente con la primera y positivamente con la segunda. El balance global fue un efecto positivo sobre el rendimiento a través de su correlación con el NP a través de estas dos vías. En 2009, la falta de diferenciación en el NMT por la aplicación tardía del tratamiento provocó que esta variable no mostrara correlaciones con ninguna otra. Por lo tanto, en este segundo año de experimentación, la mayor densidad de panículas fue sólo respuesta lineal de la eficiencia.

**Tabla 58 Matrices de correlación de Pearson (r) entre el rendimiento, los parámetros de productividad y de dinámica poblacional del ahijado.**

2008	R	NP	NGP	FERT	PMG	NGM2	NMT	Ef
R	1.00							
NP	0.61*	1.00						
NGP	0.36	-0.51	1.00					
FERT	0.42	0.35	-0.009	1.00				
PMG	0.12	0.40	-0.46	0.47	1.00			
NGM2	0.99***	0.60*	0.40	0.38	0.03	1.00		
NMT	-0.04	0.61*	-0.74**	0.35	0.32	-0.07	1.00	
Ef	0.68*	0.24	0.44	-0.10	-0.03	0.69*	-0.62*	1.00
2009	R	NP	NGP	FERT	PMG	NGM2	NMT	Ef
R	1.00							
NP	0.69*	1.00						
NGP	0.01	-0.67*	1.00					
FERT	-0.39	-0.28	0.07	1.00				
PMG	0.28	0.10	-0.19	-0.36	1.00			
NGM2	0.96***	0.70*	0.06	-0.36	0.02	1.00		
NMT	0.08	0.28	-0.11	-0.42	-0.46	0.25	1.00	
Ef	0.63*	0.80**	-0.58*	-0.009	0.40	0.53	-0.35	1.00

Acrónimos: R (rendimiento); NP (número panículas); NGP (número granos por panícula); FERT(fertilidad); PMG (peso mil granos); NGM2 (número granos por m<sup>2</sup> o capacidad sumidero); NMT (número máximo de tallos); Ef (eficiencia del ahijado, %). Niveles de significación:\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

Las relaciones establecidas entre las diferentes variables estudiadas condujeron a dos conclusiones principales: 1) el rendimiento respondió de forma directa al número de panículas y 2) la intervención del ahijado otorga a la eficiencia del ahijado y a la fase vegetativa un papel clave en el rendimiento que supera los efectos compensatorios que tenían lugar a partir de la fase reproductiva. Por consiguiente, los resultados sugirieron el componente del rendimiento con mayor peso sobre el rendimiento es la densidad de panículas, subrayando una vez más la importancia de la fase vegetativa en la productividad del cultivo. Sin embargo, sin un control sobre las relaciones establecidas durante el ciclo, su papel puede ser anulado en los estadios posteriores.

Pham Quang, *et al.* (2004a) consiguieron una mejora en la eficiencia del ahijado a través de la reducción de dosis y del fraccionamiento del abonado nitrogenado pero que no resultó en un mayor rendimiento porque el número de panículas y su tamaño fue inferior probablemente por la insuficiente cantidad de N aportada. Lafarge, *et al.*, (2004a), para estudiar la influencia del control del ahijado sobre el rendimiento, compararon una variedad híbrida con una capacidad de ahijado reducida con una variedad convencional con mayor habilidad en el ahijado. El mayor rendimiento obtenido en la variedad híbrida se atribuyó al cese del ahijado más temprano que permitió una superioridad en la eficiencia del ahijado seguida de un menor número de panículas que posteriormente fue compensado por el mayor índice de cosecha gracias a una mejor distribución de los asimilados. Como se verá en la próxima sección, en

nuestro caso no hubo diferenciación en la distribución de los asimilados dado que el peso de las panículas no mostró diferencias según el tratamiento. Por consiguiente, en nuestro caso la mejora en el rendimiento no responde a una mejora en la compartimentación de los asimilados. Por otro lado, estos resultados se contradicen con los observados por Ao, *et al.* (2009) donde no se observó respuesta en el rendimiento con la reducción del número de tallos improductivos. Justificaron este resultado por la traslocación de los fotosintatos producidos en los tallos improductivos hacia los productivos. Sin embargo, en el mismo artículo se admite que la metodología podría haber influenciado en los resultados porque la reducción del número de tallos improductivos se realizó o bien manualmente o bien limitando el espacio de desarrollo de las plantas. En el primer caso, la entrada continua en el campo con las pisadas, etc. podría haber dañado o afectado al desarrollo de la planta; en el segundo, el cultivo de las plantas en estos recipientes podría afectar la arquitectura de la planta y consecuentemente también su rendimiento. En cambio, la eliminación manual de los tallos improductivos sí funcionó en sorgo (Lafarge, *et al.*, 2002) con un aumento del rendimiento de 9 a 11 t x ha<sup>-1</sup>. Pasuquin, *et al.* (2007) realizaron un estudio para determinar si la eficiencia del cultivo es un carácter relevante para conseguir aumentar el potencial productivo. En sus ensayos consiguieron reducir los índices de mortalidad mediante diferentes edades de trasplante y con el mismo procedimiento que en la presente Tesis, aumentando la lámina de agua hasta 10 cm a partir de mediados de ahijado y hasta inicio de panículo. La disminución de la mortalidad sólo trascendió en el rendimiento cuando se promovió el ahijado precoz mediante el trasplante de plántulas “jóvenes”. Concluyeron que sólo se conseguía este efecto cuando los tallos que morían pudiesen haber interferido en la captación de la radiación. La comparación de nuestro estudio con el presentado por Pasuquin *et al.* (2007)

redunda en la importancia del ahijado precoz y, además, contrasta la competencia por la luz establecida entre el ahijado productivo y el improductivo en los dos experimentos. En el Delta del Ebro, los tallos improductivos sí hubiesen interferido en la actividad fotosintética del cultivo mientras que en las condiciones de Pasuquin, los tallos improductivos hubiesen interceptado la luz no captada por los productivos sin representar una competencia por este recurso. Este comportamiento sugiere una diferente arquitectura de las plantas, con más niveles y mayor diferenciación jerárquica de los tallos respecto nuestras variedades.

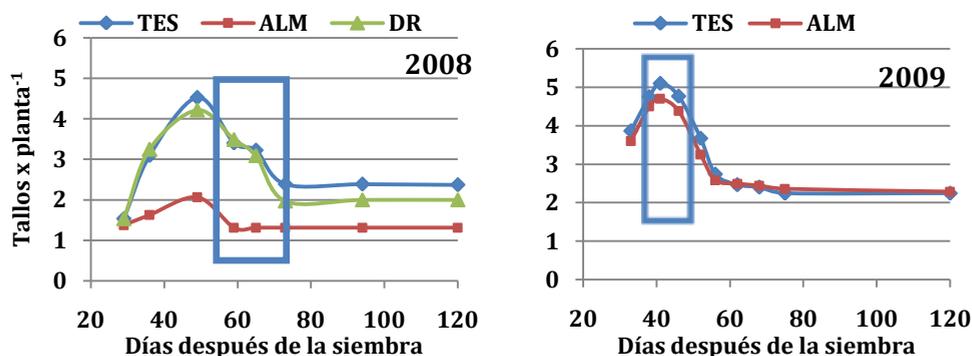
El secado de las parcelas no funcionó como método para la intervención del ahijamiento y, además, se obtuvieron los peores resultados en el rendimiento ( $583 \text{ g x m}^{-2}$ ) comparados con los 657 y 809 en TES y ALM, respectivamente. El menor rendimiento se puede atribuir a los bajos tamaños de panícula obtenidos, con una media de 52 granos por panícula mientras que en TES y ALM se superaban los 55. La ausencia de la lámina de agua podría haber comportado una situación de estrés en las plantas por salinidad reduciendo el tamaño de la panícula (Zeng, *et al.*, 2001).

Por lo tanto, reiteradamente durante los dos años de experimentación la interrupción del ahijamiento permite aumentar la eficiencia del proceso repercutiendo positivamente en el rendimiento.

### 3.4.2 Efectos del control del ahijamiento sobre la dinámica en planta y su relación con el rendimiento

#### Evaluación del método para el control ahijamiento y su influencia sobre la dinámica a nivel de planta

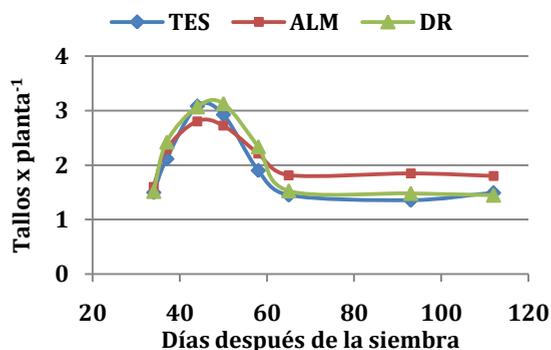
A continuación se exponen los resultados sobre la evolución del número de tallos en planta obtenidos a partir de la monitorización del ahijado en las plantas de seguimiento (Fig. 69).



**Fig. 69 Influencia del control del ahijado a través del manejo de agua en el ahijamiento en planta en 2008 y 2009.** (TES: testigo; ALM: aumento lámina; DR: drenaje). El rectángulo indica el periodo de aplicación de los tratamientos: 43-60 DDS y 39-52 DDS, en 2008 y 2009, respectivamente.

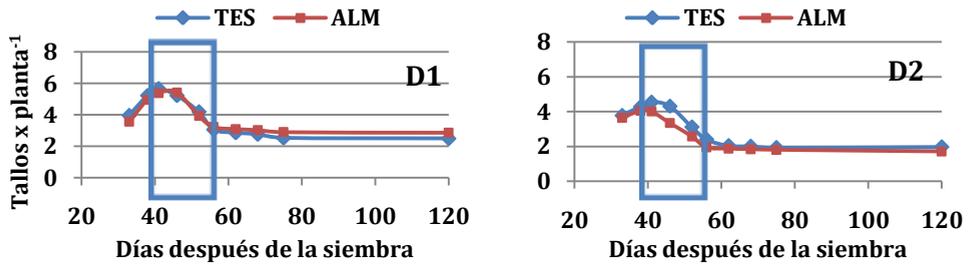
En 2008, las plantas de monitorización correspondientes al tratamiento ALM tuvieron un ahijamiento muy débil ya antes de la aplicación del tratamiento y en las dos repeticiones, que imposibilitó el análisis del efecto del tratamiento en el ahijamiento de la planta en este año. Tal y como se puede observar en la figura 69, el número de tallos a los 36 DDS (3 días antes del inicio del manejo diferenciado de agua) era en ALM de 1.6 tallos x planta<sup>-1</sup>, mientras que en TES y

en DR era de 3.1 y 3.3, respectivamente. Complementariamente, se muestra la dinámica del ahijado en planta en las microparcels (Fig. 70).



**Fig. 70 Influencia del control del ahijado a través del manejo de agua en la dinámica del ahijado en planta en 2008.** Datos obtenidos en las microparcels.

En 2009, se observó un leve efecto del aumento de la lámina en el ahijamiento, reduciendo el NMT en ALM (4.7 tallos x planta<sup>-1</sup>) respecto TES (5.1). El número de panículas por planta se igualó, con 2.2 y 2.3 por planta en TES y ALM, respectivamente. Se separaron los datos según la dosis de siembra (Fig. 71) para poder ampliar el número de observaciones y mejorar la comprensión del efecto del tratamiento y su relación posterior con el rendimiento en la planta. Los gráficos muestran leves diferencias no significativas en la respuesta de la planta con el aumento de la lámina.



**Fig. 71 Influencia control del ahijado a través del manejo de agua en la dinámica del ahijamiento en planta en 2009 en las dos dosis de siembra: 160 (D1) y 210 (D2) kg semilla x ha<sup>-1</sup>.** Los rectángulos indican el periodo de aplicación de los tratamientos: 43-60 DDS y 39-52 DDS, en 2008 y 2009, respectivamente.

En D1 (160 kg semilla x ha<sup>-1</sup>), la evolución del número de tallos fue muy similar en ambos tratamientos hasta la fijación del número de panícula que fue ligeramente superior en ALM (2.9 panículas x planta<sup>-1</sup>) que en TES (2.5 panículas x planta<sup>-1</sup>) debido al mayor porcentaje de eficiencia registrado (53% y 45% en ALM y TES, respectivamente). En cambio, en D2 (210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>) las mayores diferencias se detectaron justo después de la aplicación del tratamiento y el NMT en ALM fue de 4.9 tallos x planta<sup>-1</sup> frente los 4.3 en TES. Las diferencias en la densidad de tallos se mantuvieron e incluso incrementaron durante los siguientes 20 días. Finalmente, el número de tallos se fijó e igualó para ambos tratamientos en 1.9 panículas por planta. Las diferencias en la dinámica de los tallos en planta sólo diferenciaron en 2 puntos la eficiencia del ahijamiento, con un 44% en ALM y un 42% en TES. La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos y en su interacción con la densidad de planta, así como el reducido margen de diferenciación entre las medias conducen a la conclusión que el diferente comportamiento entre dosis de siembra fue debido a factores aleatorios.

Por tanto, el retraso en la aplicación del tratamiento impidió observar respuestas evidentes de la planta al aumento de la lámina. En D1, no hubo interrupción del ahijamiento aunque la mayor profundidad de la lámina redujo los porcentajes de mortalidad de los tallos, probablemente por una mayor concentración de N foliar tal y como se explicó en el apartado anterior. En cambio, en D2 el ALM sí consiguió parar el ahijamiento reduciendo el NMT pero sólo mejoró la eficiencia en un 2%, lo que impidió la diferenciación del número de panículas en la planta respecto TES.

#### **3.4.2.2 Influencia del control del ahijamiento sobre el rendimiento en planta y los componentes del rendimiento**

Debido a las malas condiciones de las plantas de seguimiento en 2008, se presentan sólo los resultados de 2009. Al igual que en el apartado anterior, la interacción de los tratamientos con la dosis de siembra resultó no significativa, pero se muestran los resultados según este parámetro para subsanar la falta de número de observaciones finales dadas las incidencias de 2008.

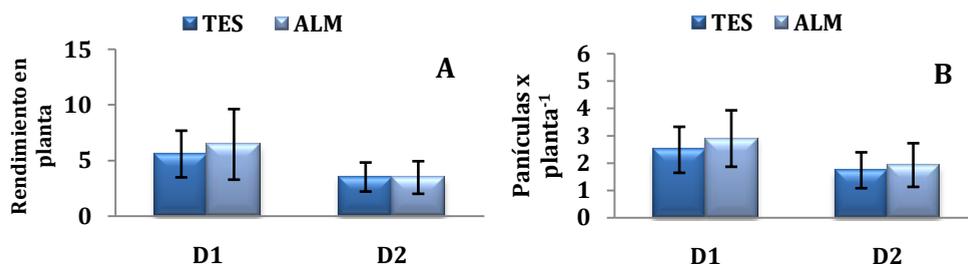
En la tabla 59 se muestran las características productivas de las plantas en 2009 según el tratamiento de control de ahijado y dosis de siembra.

**Tabla 59 Rendimiento de la planta en las parcelas TES y ALM en 2009 según la dosis de siembra: D1 (160 kg semilla x ha<sup>-1</sup>) o D2 (210 kg semilla x ha<sup>-1</sup>).**

	D1		D2	
	TES	ALM	TES	ALM
R	5.6±2.1	6.5±3.2	3.5±1.3	3.5±1.5
NP	2.5±0.8	2.9±1.0	1.7±0.7	1.9±0.8
Peso Pan	2.2±0.6	2.2±0.8	2.0±0.7	1.9±0.7
NGP	69.9±19.4	69.8±22.2	64.2±25.4	62.9±22.6
FERT	92.6±3.8	92.8±4.4	93.2±3.8	92.0±3.5

Acrónimos y unidades: R (rendimiento, g x planta<sup>-1</sup>); NP (número panículas por planta); Peso Pan (peso panícula, g); NGP (número granos por panícula); FERT(fertilidad). Media±desviación estándar.

El rendimiento en planta mostró cierta superioridad a favor del tratamiento ALM en las plantas sembradas a menor dosis (Fig.72). A menor dosis de siembra, la superioridad en el NP causada por el aumento de lámina no fue compensada por el tamaño de la panícula, permitiendo una respuesta positiva en el rendimiento de la planta. Sin embargo, en D2 sólo la diferencia de 0.2 panículas a favor de ALM representó una ventaja de este tratamiento porque posteriormente fue anulada mediante el tamaño y el peso de las panículas, impidiendo la diferenciación de rendimientos. Por consiguiente, se deduce que además del aumento en el NP, el aumento de la lámina de agua permite conseguir una superioridad competitiva de las plantas mejorando su estado para evitar los fenómenos compensatorios. El retraso en la aplicación del tratamiento pudo haber impedido una mejora sustancial del estado de las plantas ALM en D2 respecto TES como consecuencia de la presión ya existente por una mayor densidad de planta.



**Fig. 72** Influencia del control del ahijado a través del manejo de agua en el rendimiento ( $\text{g} \times \text{planta}^{-1}$ ) (A) y número panículas en planta (B) en las dos dosis de siembra: 160 (D1) y 210 (D2)  $\text{kg} \text{ semilla} \times \text{ha}^{-1}$ . (TES: testigo; ALM: aumento de lámina).

Sin embargo, hay que remarcar que las diferencias no resultaron significativas y que la separación de los resultados en dosis de siembra se realizó para mejorar la comprensión de los procesos desencadenados por el aumento de la lámina y su repercusión en el rendimiento. Esto fue necesario por el escaso número final de observaciones debido a las incidencias que tuvieron lugar en 2008.



## **4. CONCLUSIONES**



## 4. CONCLUSIONES

### 4.1 Desarrollo foliar en el cultivo del arroz en el Delta del Ebro

La correcta validación del modelo de desarrollo foliar indica su idoneidad como herramienta para la predicción de la emergencia de las hojas.

La dinámica de aparición de las hojas en las plantas de arroz cultivadas en el Delta del Ebro se describe mediante una función exponencial indicando que el tiempo necesario para la emergencia consecutiva de las hojas aumenta en el tiempo. El mismo tipo de función se puede utilizar en diferentes condiciones de cultivo.

El número final de hojas en el tallo principal de la variedad Gleva es constante en los años, y no se encontró una respuesta genotípica a este parámetro ni a la tasa de emergencia de las hojas. El sistema de riego no ejerce una influencia directa sobre la tasa de emergencia de las hojas o sobre el número final pero sí lo puede hacer como resultado de la temperatura más alta en sistema de riego con lámina continua.

La densidad de planta afecta el número final de hojas a través de un retraso de la aparición de las últimas hojas debido a la competencia por luz, nutrientes y asimilados, aunque las diferencias en este parámetro sólo se detectan en amplios rangos de dosis de siembra.

Por lo tanto, el comportamiento observado del filocrón puede utilizarse en diversas condiciones de cultivo, por lo que se convierte en una herramienta útil de fácil aplicación para la descripción del desarrollo del arroz.

## 4.2 Caracterización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro

El inicio del ahijado tiene lugar a los 20 días después de la siembra (DDS) coincidiendo con la emergencia de la cuarta hoja y se alargará unos los 50 días más, hasta los 70 DDS aproximadamente. La fase de emisión de tallos se describe mediante una función sigmoidea aunque entre la segunda y sexta posición los tallos primarios emergen en intervalos constantes de 4.1 días. Luego, es posible la estimación de la aparición de los tallos según su posición.

El momento de la fase de máximo ahijamiento (FMA) es variable, entre los 38 y 54 DDS, y depende de la precocidad del ahijado y de la densidad de planta. El número máximo de tallos obtenido oscila entre los 4.4 y 4.8 tallos x planta<sup>-1</sup>.

La FMA viene seguida de procesos de senescencia de los tallos que se alargan hasta que el número de tallos productivos queda determinado, coincidiendo con la floración. La eficiencia del ahijado está entorno del 50% (entre 44 y 57%) de manera que el número final de panículas está entre 2.1 y 2.6 por planta.

El ahijado del arroz en el Delta del Ebro es básicamente primario, esto es, la estructura vegetativa de la planta se basa en los tallos primarios en un porcentaje entre el 80 y 90% y la fracción restante es ocupada únicamente por tallos secundarios, sin llegar a producirse terciarios. La presencia de estos últimos depende de la duración del ahijado y de la densidad de planta. El número de nudos primarios potenciales a desarrollar por la planta es 8, aunque en condiciones de cultivo normales se pueden desarrollan las yemas del primer hasta el séptimo nudo. La frecuencia de desarrollo de estas posiciones y su posterior supervivencia son los factores claves que determinarán su productividad y el rendimiento de la planta, puesto que sólo se aprecian leves diferencias en el peso de las panículas a partir de la quinta o sexta posición.

El segundo nivel de estructuración de los tallos se basa en el orden o posición, que hace referencia a la secuencia de aparición dentro de la misma categoría. Diferentes factores como la altura de la lámina de agua, el sistema de riego, la fertilización nitrogenada y la dosis de siembra inciden en el número total de tallos primarios y en su distribución en la planta. Por otro lado, éstos son diferentes en función del momento del ahijamiento. Siguiendo este razonamiento, se agrupan las posiciones en función de su susceptibilidad a la influencia de estos factores. El primer grupo está compuesto por los 3 primeros tallos, el segundo por los tallos T4 y T5 y el tercero por los restantes, que suelen abarcar hasta la séptima posición. Del primer grupo se separa T1 por su baja probabilidad de emergencia independientemente de las prácticas agronómicas aplicadas. El desarrollo de los nudos 2 y 3 viene determinado por la disponibilidad de recursos y la lámina de agua. El segundo grupo, formado por las posiciones centrales T4 y T5, son los que mayores porcentajes de desarrollo presentan y con mayor estabilidad de valores. El riego intermitente y superficial así como la fertilización nitrogenada a principios del ahijado promueven la aparición de los tallos de estos dos grupos. Finalmente, el tercer y último grupo es el improductivo y está formado por los tallos de posiciones más altas. Este grupo posee índices de mortalidades elevados o si llegan a sobrevivir, su aportación al rendimiento final es muy reducida. Su factor limitante es la propia competencia intraespecífica manifestada por la limitación de nutrientes y por la captación de luz. Dosis de siembra superiores a los 210 kg semilla x ha<sup>-1</sup> limitan la aparición de este grupo.

Esta agrupación de los tallos se modifica en condiciones de vigor precoz del cultivo de manera que las posiciones con mayor porcentaje de desarrollo de las yemas se avanzan y se amplían (segunda hasta quinta posición) y se reducen las no productivas.

Por lo tanto y a modo de resumen, el ahijado productivo, esto es, tallos que finalmente serán portadores de panículas, tiene lugar hasta la cuarta o quinta posición, en función del vigor del cultivo. A partir de la quinta o sexta posición el rendimiento de las panículas empieza a decrecer y se entra en la fase del ahijado improductivo, esto es, tallos que contribuyen muy poco o nada al rendimiento de la planta. Estos resultados son importantes en el sentido que definen el momento en que puede aplicarse alguna técnica para la interrupción del ahijado.

A nivel de cultivo, la evolución del número de tallos en la parcela muestra cierto retraso respecto a la planta en la consecución de las diferentes fases: la FMA se determina entre 5 días y una semana más tarde que en la planta. El número máximo de tallos y la densidad de panículas son también muy estables a lo largo de los años, con densidades entre los 980 y 1000 tallos x m<sup>-2</sup> y 475 a 500 panículas x m<sup>-2</sup>. La eficiencia del ahijado a nivel de cultivo oscila también entorno el 50%.

Las variedades Gleva y Tebre, ampliamente cultivadas en el Delta del Ebro, muestran la misma capacidad de ahijado. En las diferentes condiciones agronómicas estudiadas, su comportamiento ha sido similar.

### **4.3 El ahijamiento precoz y su influencia en el rendimiento**

El manejo de agua y la fertilización nitrogenada influyen en el desarrollo de las yemas en las posiciones más bajas, mientras que el control de posiciones más tardías es a través de la densidad de planta. La fertilización nitrogenada a inicios del ahijado y el riego intermitente superficial aumentan la frecuencia de desarrollo de estas posiciones y consiguen una mayor densidad máxima de tallos y en consecuencia, promueven crecimiento vegetativo. La repercusión en el rendimiento de esta mayor producción de tallos no siempre tiene lugar y los

resultados varían en función de la unidad experimental que se analice. Este comportamiento señala que el excesivo crecimiento vegetativo puede desencadenar una serie de efectos compensatorios que neutralizarán el mayor potencial productivo conseguido a través del fomento del ahijamiento y que presentan comportamientos variables. Estos efectos consisten en la mortalidad de los tallos, la regulación del número de grano de panícula y el peso de los granos. Por tanto, no es posible traducir esta mejora vegetativa en rendimiento si no se ejerce un control sobre el ahijado a partir del cual se limite la presencia de estos efectos.

La fase de establecimiento de la plántula es el factor que mayor influencia ejerce sobre la precocidad del ahijado y con repercusiones en el rendimiento. Un rápido y correcto establecimiento del cultivo aumenta las frecuencias de desarrollo de yemas de posiciones más bajas y permite el desarrollo más rápido de la cubierta foliar, avanzado la fase de máximo ahijado. La comparación interanual muestra la superioridad del rendimiento en estas condiciones de establecimiento óptimo del cultivo y desarrollo precoz. Con ello, se sugiere como futuros proyectos a llevar a cabo el estudio de esta fase y la determinación de los factores que inciden en su correcto desarrollo.

#### **4.4 Influencia de la densidad de planta en el ahijado y su repercusión en el rendimiento**

Los efectos de la densidad de planta sobre el ahijado se manifiestan a mitad de esta fase, alrededor de los 40 DDS, entre el octavo y noveno estadio foliar. En dosis de siembra más bajas (60-80 kg semilla x ha<sup>-1</sup>) el número máximo de tallos (NMT) alcanzado oscila entre los 8 y 11 tallos x planta<sup>-1</sup>, comparado con los aproximadamente 4 tallos conseguidos en las dosis superiores (310-320 kg semilla x ha<sup>-1</sup>). El mayor NMT responde a una etapa de emisión de tallos más

larga y a una tasa de emergencia más rápida. Finalmente, la variación en el número de panículas entre los tratamientos se reduce, con un rango comprendido entre 1.6 y 3.6 panículas x planta<sup>-1</sup> correspondiente al rango de dosis de siembra entre 310 y 80 kg semilla x ha<sup>-1</sup> en 2008 y 2009. Estos rangos pueden aumentar en caso de mayor heterogeneidad en la distribución del cultivo. La eficiencia del ahijado es inversamente proporcional a la densidad de planta, con porcentajes de mortalidad de tallos entorno al 70% para las dosis más elevadas. La dosis más baja es la que más grado de respuesta presenta respecto los otros tratamientos, mientras que a partir de 240 semillas x ha<sup>-1</sup> la pauta de comportamiento no muestra diferencias.

La relación entre el rendimiento en planta y densidad de planta se describe mediante una función logarítmica cuya expresión es:

$$\text{RendPl} = -5.4 * \ln(\text{DPL}) + 34.5$$

La función muestra como el rendimiento se asintotiza a partir de las 250 plantas x m<sup>-2</sup> con valores medios entre 2 y 3 g x planta<sup>-1</sup>, que es cuando el cultivo consistiría en una población conformada sólo de tallos principales.

A nivel de parcela, el rendimiento se mantiene estable a partir de densidades de 100 plantas x m<sup>-2</sup>. No se encontró una densidad óptima de plantas si bien en los mejores rendimientos medios se obtuvieron en las dosis de 160 kg semilla x ha<sup>-1</sup> que corresponden a densidades entre 190 y 240 plantas x m<sup>-2</sup> (equivalente a un rango de 250 a 320 semillas x m<sup>-2</sup>). El arroz es un cultivo con una gran capacidad plástica de adaptación a las diferentes densidades de planta manteniendo valores estables en el número de panículas alrededor de 400 y 450 panículas x m<sup>-2</sup>.

## 4.5 Control del ahijamiento a través del manejo de agua

Mediante el aumento de la lámina de agua hasta 1 ó 2 cm por encima de la aurícula de la última hoja desarrollada se puede detener el ahijado. La lámina profunda ejerce dos efectos sobre el ahijado que son:

- 1) Interrupción del proceso y subsiguiente reducción del número máximo de tallos
- 2) Incremento de la supervivencia de los tallos ya desarrollados.

Con estos dos efectos se consigue evitar o reducir el ahijado improductivo y aumentar la densidad de panículas. El aumento de panículas se consigue por una reducción de la mortalidad porque previamente se ha reducido la competencia intraespecífica, por lo que los efectos compensatorios posteriores durante el estadio de inicio de panícula que regulan su tamaño estarán debilitados o no tendrán lugar. Por consiguiente, el resultado final es una mejora en la eficiencia del ahijado que se traduce en un incremento capacidad sumidero del cultivo (número granos por m<sup>2</sup>). Con la aplicación de esta práctica se consiguió un incremento medio del rendimiento del 23%.

El momento de aplicación de la técnica de control del ahijamiento es determinante para conseguir buenos resultados. Un aumento tardío deja de tener efectividad sobre el ahijado aminorando sus efectos sobre el rendimiento. Por ello, es importante el seguimiento del ahijado para la determinación del inicio del ahijado improductivo. Cuando se ha conseguido un ahijado precoz se recomienda la aplicación de esta técnica después de la emergencia del cuarto tallo; en caso contrario, el momento adecuado sería después del desarrollo del quinto. La tasa de emergencia de los tallos en sus nudos centrales (a partir de la segunda posición) es constante a razón de 4 días x tallo<sup>-1</sup>, por lo que la

predicción del momento en que se desarrollan las diferentes posiciones es relativamente sencilla. Por lo tanto, el desarrollo del cuarto tallo tiene lugar 8 días después del segundo cuya identificación resulta simple por las condiciones del cultivo. La estimación de la emergencia de los tallos también se puede realizar aprovechando la relación sincrónica con el desarrollo foliar que establece la aparición de 0.8 tallos por cada hoja desarrollada a partir del inicio del ahijado.



## **5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abeledo LG, Calderini DF y Slafer GA. 2004. Leaf appearance, tillering and their coordination in old and modern barleys from Argentina. *Field Crops Research*, 86: 23-32

Ao H, Peng S, Zou Y, Tang Q y Visperas RM. 2009. Reduction of unproductive tillers did not increase the grain yield of irrigated rice. *Field Crops Research*, 116: 108-115

Berry PM, Spink JH, Foulkes MJ y Wade A. 2003. Quantifying the contributions and losses of dry matter from non-surviving shoots in four cultivars of winter wheat. *Field Crops Research*, 80: 111-121

Birch CJ, Vos L y Kiniry JR. 1998. Towards a robust method of modelling leaf appearance in plants. *Agronomy, Growing a Greener Future: Proceedings of the Ninth Australian Agronomy Conference* Charles Sturt University, Wagga Wagga

Bond JA, Walker TW, Ottis BV y Harrell DL. 2008. Rice Seeding and Nitrogen Rate Effects on Yield and Yield Components of Two Rice Cultivars. *Agron J*, 100: 393-397

Bos HJ y Neuteboom JH. 1998. Morphological analysis of leaf and tiller number dynamics of wheat (*Triticum aestivum* L.): Responses to temperature and light intensity. *Annals of Botany*, 81: 131-139

Bueno CS y Lafarge T. 2009. Higher crop performance of rice hybrids than of elite inbreds in the tropics: 1. Hybrids accumulate more biomass during each phenological phase. *Field Crops Research*, 112: 229-237

Cao W y N.Moss D. 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Science*, 29: 1018-1021

Casanova D, Goudriaan J, Forner MMC y Withagen JCM. 2002. Rice yield prediction from yield components and limiting factors. *European Journal of Agronomy*, 17: 41-61

Català MM y Fosch T. 1997. Estudio de los factores que inciden en el rendimiento del arroz en el Delta del Ebro. *Agrícola Vergel*, 120-128

Català MM, Jardí M y Pla E. 2007. Evolución de las variedades de arroz cultivadas en el Delta del Ebro durante los últimos veinte años. *Agrícola Vergel*, 303: 4

Counce PA. 1987. Asymptotic and Parabolic Yield and Linear Nutrient Content Responses to Rice Population Density. *Agron J*, 79: 864-869

Counce PA, Keisling TC y Annis DC, Jr. 2000. Using rice growth staging as an aid to crop management. *Research Series - Arkansas Agricultural Experiment Station*, 9-14

Counce PA, Siebenmorgen TJ, Poag MA, Holloway GE, Kocher MF y Lu R. 1996. Panicle emergence of tiller types and grain yield of tiller order for direct-seeded rice cultivars. *Field Crops Research*, 47: 235-242

del Moral MBG y del Moral LFG. 1995. Tiller production and survival in relation to grain yield in winter and spring barley. *Field Crops Research*, 44: 85-93

Dingkuhn M, De Datta SK, Javellana C, Pamplona R y Schnier HF. 1992. Effect of late-season N fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. I. Growth dynamics. *Field Crops Research*, 28: 223-234

Dingkuhn M, Penning de Vries FWT, DeDatta SK y Van Laar HH. 1991. Concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. *Direct Seeded Flooded Rice in the Tropics*, Seoul, Korea

Dingkuhn M, Schnier HF, De Datta SK, Dorffling K, Javellana C y Pamplona R. 1990. Nitrogen Fertilization of Direct-Seeded Flooded vs. Transplanted Rice: II. Interactions among Canopy Properties. *Crop Sci*, 30: 1284-1292

Elhani S, Martos V, Rharrabti Y, Royo C y García del Moral LF. 2007. Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments. *Field Crops Research*, 103: 25-35

Ellis RH, Qi A, Summerfield RJ y Roberts EH. 1993. Rates of Leaf Appearance and Panicle Development in Rice (*Oryza-Sativa* L) - a Comparison at 3 Temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66: 129-138

Evers JB, Vos J, Andrieu B y Struik PC. 2006. Cessation of Tillering in Spring Wheat in Relation to Light Interception and Red : Far-red Ratio. *Ann Bot*, 97: 649-658

Fukuda K y Iwanami K. 2006. Effects of Temperature and Depth of Irrigation Water on Growth and Development in Paddy Rice (*Oryza sativa* L.). *Mem Fac Agric Kagoshima Univ*, 41: 9-18

Gao ZY, Qian Q, Liu XH, Yan MX, Feng Q, Dong GJ, Liu J y Han B. 2009. Dwarf 88, a novel putative esterase gene affecting architecture of rice plant. *Plant Molecular Biology*, 71: 265-276

Gendua PA, Yamamoto Y y Miyazaki A. 2007. Effects of the first tillering node on the growth and yield-related characters in rice cultivars with different plant type in relation to cropping season. *Shikoku J.Crop Sci*, 44: 36-37

Gendua PA, Yamamoto Y, Miyazaki A, Yoshida T y Wang YL. 2009. Effects of the Tillering Nodes on the Main Stem of a Chinese Large-Panicle-Type Rice Cultivar, Yangdao 4, on the Growth and Yield-Related Characteristics in Relation to Cropping Season. *Plant Production Science*, 12: 257-266

Gun Won J, Soo Choi J, Phil Lee S, Ho Son S y Ok Chung S. 2005. Water Saving by Shallow Intermittent Irrigation and Growth of Rice. *Plant Production Science*, 8: 487-492

Horie T, Shiraiwa T, Homma K, Katsura K, Maeda S y Yoshida H. 2005. Can Yields of Lowland Rice Resume the Increases that They Showed in the 1980s? *Plant Production Science*, 8: 259-274

Ishibashi T, Nakamura S, Saito M y Goto Y. 2009. Tillering and Yield of Rice Cultivars under a Water Storage-Type Deep-Irrigation Regime. *Plant Production Science*, 12: 237-242

Ishikawa S, Maekawa M, Arite T, Onishi K, Takamura I y Kyojuka J. 2005. Suppression of tiller bud activity in tillering dwarf mutants of rice. *Plant and Cell Physiology*, 46: 79-86

Itoh J, Sato Y, Nagato Y y Matsuoka M. 2006. Formation, maintenance and function of the shoot apical meristem in rice. *Plant Molecular Biology*, 60: 827-842

Jaffuel S y Dauzat J. 2005. Synchronism of leaf and tiller emergence relative to position and to main stem development stage in a rice cultivar. *Annals of Botany*, 95: 401-412

Jiang PY, Ma YF, Hong XF, Feng LD, Shi LL y Gu XF. 1994. Studies on the sensitive stage to environment during differentiation and development of tiller buds in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 20: 290-296

Kariali E, Kuanar SR y Mohapatra PK. 2008. Individual tiller dynamics of two wild *Oryza* species in contrasting habitats. *Plant Production Science*, 11: 355-360

Katerji N, Mastrorilli M y Rana G. 2008. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*, 28: 493-507

Kato Y y Katsura K. 2010. Panicle architecture and grain number in irrigated rice, grown under different water management regimes. *Field Crops Research*, 117: 237-244

Kim JK y Vergara BS. 1990. Tillering behavior of low and high tillering rices. *Korean Journal of Crop Sciences*, 35: 512-517

Kirby EJM. 1990. Co-ordination of leaf emergence and leaf and spikelet primordium initiation in wheat. *Field Crops Research*, 25: 253-264

Kirby EJM, Margaret A y Gwynneth F. 1985. Leaf emergence and tillering in barley and wheat. *Agronomie*, 5: 193-200

Kon K, Kaneta Y, Sato A, Shibata S, Sato K y Miura C. 2003. Development period, number of tillers and percentage of productive culm within nodal position of tiller in rice cultivar Akitakomachi. *Tohoku Journal of Crop Science*, 47-49

Koutroubas SD y Ntanos DA. 2003. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 83: 251-260

Lafarge M, Broad IJ y Hammer GL. 2002. Tillering in Grain Sorghum over a Wide Range of Population Densities: Identification of a Common Hierarchy for Tiller Emergence, Leaf Area Development and Fertility. *Ann Bot*, 90: 87-98

Lafarge T y Bueno CS. 2009. Higher crop performance of rice hybrids than of elite inbreds in the tropics: 2. Does sink regulation, rather than sink size, play a major role? *Field Crops Research*, 112: 238-244

Lafarge T, Tubana B y Pasuquin E. 2004a. Yield advantage of hybrid rice induced by its higher control in tiller emergence. *4th International Crop Science Congress*, Brisbane

Lafarge TA y Hammer GL. 2002. Tillering in grain sorghum over a wide range of population densities: Modelling dynamics of tiller fertility. *Annals of Botany*, 90: 99-110

Lauer JG y Simmons SR. 1985. Photoassimilate Partitioning of Main Shoot Leaves in Field-Grown Spring Barley. *Crop Sci*, 25: 851-855

Lauer JG y Simmons SR. 1988. Photoassimilate Partitioning by Tillers and Individual Tiller Leaves in Field-Grown Spring Barley. *Crop Sci*, 28: 279-282

Lauer JG y Simmons SR. 1989. Canopy Light and Tiller Mortality in Spring Barley. *Crop Sci*, 29: 420-424

Lee C, Lee B, Shin J y Yoon Y. 2001. Heading date and final leaf number as affected by sowing date and prediction of heading date based on leaf appearance model in rice. *Korean Journal of Crop Science*, 46: 195-201

Li XY, Qian Q, Fu ZM, Wang YH, Xiong GS, Zeng DL, Wang XQ, Liu XF, Teng S, Hiroshi F, Yuan M, Luo D, Han B y Li JY. 2003. Control of tillering in rice. *Nature*, 422: 618-621

Lin XQ, Zhou WJ, Zhu DF y Zhang YB. 2005. Effect of SWD irrigation on photosynthesis and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, 94: 67-75

Lu J, Liu Y y Hirasawa T. 2001. Study on intermittent irrigation for paddy rice: II. Crop responses. *Pedosphere*, 11: 227-234

Lubis I, Shiraiwa T, Ohnishi M, Horie T y Inoue N. 2003. Contribution of Sink and Source Sizes to Yield Variation among Rice Cultivars. *Plant Production Science*, 6: 119-125

Marques L. 2010. Director-gerente Copsemar

Matsuo T y Hoshikawa K. 1993. *Science of Rice Plant*. Food and Agriculture Policy Research Center.

McMaster GS. 2005. Phytomers, phyllochrons, phenology and temperate cereal development. *The Journal of Agricultural Science*, 143: 137-150

McMaster GS y Wilhelm WW. 2003. Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. *Journal of Agricultural Science*, 141: 129-147

Miglietta F. 1991. Simulation of wheat ontogenesis.I. Appearance of main stem leaves in the field. *Climate research*, 1: 145-150

Miyamoto N, Goto Y, Matsui M, Ukai Y, Morita M y Nemoto K. 2004. Quantitative trait loci for phyllochron and tillering in rice. *Theoretical and Applied Genetics*, 109: 700-706

Mohapatra PK y Kariali E. 2008. Time of emergence determines the pattern of dominance of rice tillers. *Australian Journal of Crop Science*, 1: 53-62

Mundstock CM y Bredemeier C. 2002. Tillering dynamics as affected by nitrogen supply and its influence on wheat ear and grain production. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 26: 141-149

Nemoto K, Morita S y Baba T. 1995. Shoot and Root Development in Rice Related to the Phyllochron. *Crop Science*, 35: 24-29

Ntanos DA y Koutroubas SD. 2002. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 74: 93-101

Nuruzzaman M, Yamamoto Y, Nitta Y, Yoshida T y Miyazaki A. 2000. Varietal differences in tillering ability of fourteen japonica and indica rice varieties. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46: 381-391

Pasuquin E, Lafarge T y Tubana B. 2008. Transplanting young seedlings in irrigated rice fields: Early and high tiller production enhanced grain yield. *Field Crops Research*, 105: 141-155

Pasuquin E, Wiangsamut B, Bueno C y Lafarge T. 2007. Is tiller efficiency a relevant trait in selecting for high yield potential in rice? *19th FCSSP Scientific Conference*, Tagaytay City

Petróczi IM y Matuz J. 2002. Seasonal study of tillering and phyllcochron of winter wheat in field trials. *Acta Biologica Szegediensis*, 46: 209-210

Pham Quang D, Mitsugu H, Satoru S y Eiki K. 2004a. Varietal differences in tillering and yield responses of rice plants to nitrogen-free basal dressing accompanied with sparse planting density in the Tohoku region of Japa. *Plant Production Science*, 7: 3-10

Pham Quang D, Tanaka D, Abe A, Sagawa S y Kuroda E. 2004b. Analysis of the number of spikelets per panicle on the main stems, primary and secondary tillers of different rice genotypes grown under the conventional and nitrogen-free basal dressing accompanied with sparse planting density practices. *Plant Production Science*, 7: 456-462

Rashid MH y Khan MAH. 2006. Tillering dynamics and productivity of BRRI dhan44 as influenced by spacing and nitrogen management technique. *Journal of agriculture and rural development*, 4: 47-52

Samonte SOPB, Wilson LT y Tabien RE. 2006. Maximum node production rate and main culm node number contributions to yield and yield-related traits in rice. *Field Crops Research*, 96: 313-319

San-oh Y, Mano Y, Ookawa T y Hirasawa T. 2004. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting patterns. *Field Crops Research*, 87: 43-58

Sangoi L, Bianchet P, da Silva PRF, Fiorentin CF, Zanin CG, Schmitt A, Neto DAD, Motter F, Saldanha A y Schweitzer C. 2008a. Soil drainage periods during

tillering and agronomic traits of rice cultivars grown with pre-germinated seeds. *Ciencia Rural*, 38: 27-33

Sangoi L, Bianchet P, Ernani PR, Ferreira da Silva PR, Fiorentin CF, Zanin CG, Schmitt A, de Oliveira AC, Motter F y Schweitzer C. 2008b. Soil drainage at tillering does not stimulate pre-germinated rice root growth. *Ciencia Rural*, 38: 77-83

Sasaki R y Toriyama K. 2006. Nitrogen content of leaves affects the nodal position of the last visible primary tiller on main stems of rice plants grown at various plant densities. *Plant Production Science*, 9: 242-248

Schnier HF, Dingkuhn M, De Datta SK, Mengel K y Faronilo JE. 1990. Nitrogen Fertilization of Direct-Seeded Flooded vs. Transplanted Rice: I. Nitrogen Uptake, Photosynthesis, Growth, and Yield. *Crop Sci*, 30: 1276-1284

Shahidullah SM, Hanafi MM, Ashrafuzzaman M, Ismail MR y Salam MA. 2009. Tillering Dynamics in Aromatic Rice Genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11: 509-514

Sheehy JE, Dionora MJA y Mitchell PL. 2001. Spikelet numbers, sink size and potential yield in rice. *Field Crops Research*, 71: 77-85

Slafer GA, Connor DJ y Halloran GM. 1994. Rate of Leaf Appearance and Final Number of Leaves in Wheat: Effects of Duration and Rate of Change of Photoperiod. *Ann Bot*, 74: 427-436

Sparkes DL, Holme SJ y Gaju O. 2006. Does light quality initiate tiller death in wheat? *European Journal of Agronomy*, 24: 212-217

Takahashi K. 1992. Analysis of Developmental Phase of Stem in High Nodal-Position Tillers in Rice Plants. *Japanese Journal of Crop Science*, 61: 49-55

Tivet F, da Silveira Pinheiro S, de Raïssac M y Dingkuhn M. 2001. Leaf blade dimensions of rice (*Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud.). Relationships between tillers and the main stem. *Annals of Botany*, 88: 507-511

Thorne GN, Wood DW. 1987. The fate of carbon in dying tillers of winter wheat. *Journal of Agricultural Science*, 108: 515-522.

Uphoff N. 1999. Agroecological Implications of the System of Rice Intensification (SRI) in Madagascar. *Environment, Development and Sustainability*, 1: 297-313

Valério IP, Félix de Carvalho FI, Costa de Oliveira A, De almedia Machado A, Benin G, Scheeren PL, Quieróz de Souza V y Hartwig I. 2008. Tiller development and yield components in wheat genotypes under different seeding densities. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43: 319-326

Virk P, S. VS, V L y R C. 2004. Enhancing water productivity in irrigated rice. *New directions for a diverse planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia

Wang F, Cheng F y Zhang G. 2007. Difference in grain yield and quality among tillers in rice genotypes differing in tillering capacity. *Rice Science*, 14: 135-140

Wang Y y Li J. 2005. The Plant Architecture of Rice (*Oryza sativa*). *Plant Molecular Biology*, 59: 75-84

Wells BR y Wade F. 1978. Short-statured rice response to seeding and N rates. *Agronomy Journal*, 70: 477-480

Wilhelm W y McMaster G. 1995a. Symposium on the Phyllochron: importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. *Crop Sci*, 35: 1-3

Wilhelm WW y McMaster GS. 1995b. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. *Crop Science*, 35: 1-3

Wilhelm WW, McMaster GS, Rickman RW y Klepper B. 1993. Aboveground vegetative development and growth of winter-wheat as influenced by nitrogen and water availability. *Ecological Modelling*, 68: 183-203

Won JG, Choi CD y Lee SC. 1999a. Interaction between N application and water management in dry-seeded rice. *Plant Production Science*, 2: 109-114

Won JG, Choi CD y Lee SC. 1999b. Tiling, lodging and yield under deep water treatment in direct-seeded rice  
*Plant Production Science*, 2: 200-205

Wu G, Wilson LT y McClung AM. 1998. Contribution of Rice Tillers to Dry Matter Accumulation and Yield. *Agron J*, 90: 317-323

Xie G-h, Yu J, Wang H-q y Bouman BAM. 2008. Progress and Yield Bottleneck of Aerobic Rice in the North China Plain: A Case Study of Varieties Handao 297 and Handao 502. *Agricultural Sciences in China*, 7: 641-646

Yan J, Yu J, Tao GC, Vos J, Bouman BAM, Xie GH y Meinke H. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and nonflooded soils in the Huai River Basin of China. *Field Crops Research*, In Press, Corrected Proof:

Yan J, Yu J, Tao GC, Vos J, Bouman BAM, Xie GH y Meinke H. 2009. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and nonflooded soils in the Huai River Basin of China. *Field Crops Research*, 116: 252-259

Yang J, Peng S, Zhang Z, Wang Z, Visperas RM y Zhu Q. 2002. Grain and Dry Matter Yields and Partitioning of Assimilates in Japonica/Indica Hybrid Rice. *Crop Sci*, 42: 766-772

Yin XY y Kropff MJ. 1996. The effect of temperature on leaf appearance in rice. *Annals of Botany*, 77: 215-221

Yoshida H, Bhattacharjee Dp y Cabuslay GS. 1982. Relationship between plant type and root growth in rice. *Soil Science and Plant Nutrition*, 28: 473-482

Yoshida S. 1981. *Fundamentals of rice crop science*. The International Rice Research Institute.

Yoshida S y Parao FT. 1972. Performance of Improved Rice Varieties in the Tropics with Special Reference to Tillering Capacity. *Experimental Agriculture*, 8: 203-212

Zeng L, Shannon MC y Lesch SM. 2001. Timing of salinity stress affects rice growth and yield components. *Agricultural Water Management*, 48: 191-206

Zhong X, Peng S, Sanico AL y Liu H. 2003. Quantifying the Interactive Effect of Leaf Nitrogen and Leaf Area on Tillering of Rice. *Journal of Plant Nutrition*, 26: 19

Zhong X, Peng S, Sheehy JE, Visperas RM y Liu H. 2002. Relationship between tillering and leaf area index: quantifying critical leaf area index for tillering in rice. *Journal of Agricultural Science*, 138: 269-279

