

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

TÍTULO

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN LA
VIABILIDAD DEL GRANO DE POLEN DE CUATRO VARIEDADES DE ARROZ**

DENISSE DANIELA ZAMORANO MERIÑO

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

TÍTULO

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN LA
VIABILIDAD DEL GRANO DE POLEN DE CUATRO VARIEDADES DE ARROZ**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF WATER TEMPERATURE ON THE
VIABILITY OF POLLEN GRAINS OF FOUR VARIETIES OF RICE**

DENISSE DANIELA ZAMORANO MERIÑO

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

TÍTULO

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN LA
VIABILIDAD DEL GRANO DE POLEN DE CUATRO VARIEDADES DE ARROZ**

Memoria para optar al título profesional de: Ingeniero Agrónomo.

Denisse Daniela Zamorano Meriño

Profesor Guía	Calificaciones
Sr. Edmundo Acevedo H. Ingeniero Agrónomo, M. S., Ph. D.	70
Profesores Evaluadores	
Sr. Claudio Pastenes V. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	68
Sr. Tomislav Curkovic S. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	67

Santiago, Chile
2010

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	4
Hipótesis.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
MATERIALES Y MÉTODOS	8
Establecimiento del ensayo.....	8
Condiciones térmicas.....	9
Diseño de Experimentos y Tratamientos.....	12
Mediciones.....	13
Evaluación del rendimiento.....	13
Evaluación de la esterilidad floral.....	13
Evaluación de la viabilidad de los granos de polen.....	13
Evaluación del porcentaje de vanazón.....	14
RESULTADOS	15
Descripción de las condiciones térmicas.....	15
Evaluación del rendimiento.....	16
Evaluación de la esterilidad floral.....	17
Evaluación de la viabilidad de los granos de polen.....	17
Evaluación del porcentaje de vanazón.....	20
Análisis de correlación entre las variables porcentaje de polen inviable, porcentaje de vanazón y rendimiento.....	23
DISCUSIÓN	25
CONCLUSIONES	27
LITERATURA CITADA	29
ANEXOS	32
APÉNDICES	33

RESUMEN

En Chile el arroz (*Oryza sativa L.*) se cultiva desde la región de O'Higgins a la del Biobío, en una superficie de 24.527 hectáreas, con un rendimiento promedio de 53,8 qq ha⁻¹, inferior al rendimiento considerado óptimo (80 qq ha⁻¹). Se cultivan variedades de arroz del tipo Japónica, que son tolerantes al frío en estados tempranos de desarrollo, pues las bajas temperaturas ($T < 20^{\circ}\text{C}$) limitan el rendimiento de este cultivo, siendo la etapa reproductiva la más sensible al daño por frío. Para conocer la respuesta al frío de tres variedades cultivadas (Oro, Dimante-INIA y Ámbar-INIA) y de una nueva línea en tramitación para su liberación (Harika), éstas fueron expuestas a cinco diferentes condiciones térmicas del agua. Para todas las variedades se estudió el grado de influencia de la esterilidad masculina (granos de polen inviábiles) tiñendo granos de polen con lugol y se calculó el porcentaje de granos de polen inviábiles (PPI) a través del software de análisis de imagen SigmaScan pro5. Este valor se relacionó con la esterilidad floral a cosecha (porcentaje de vanazón, PV) y el rendimiento. El PV se obtuvo pesando los granos provenientes de diez panículas de cada variedad escogidas al azar en cada parcela; y el rendimiento (REND) se obtuvo cosechando la totalidad de la parcela. Al hacer un análisis de correlación entre PPI y los otros dos parámetros (PV y REND) no se encontró una relación significativa, pero se encontró un coeficiente de correlación significativo y negativo entre PV y REND, siendo las variedades Harika y Oro las que tuvieron los menores porcentajes de vanazón y los más altos rendimientos en todas las condiciones térmicas a las que fueron sometidas, posicionándose estas variedades como una muy buena alternativa en zonas donde la temperatura del agua no alcanza a superar los 20°C.

Palabras clave: *Oryza sativa L.*, granos de polen, daño por frío, esterilidad floral.

ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa L.*) is grown in Chile from the O'Higgins Region to the Biobío Region, in an area of 24,527 hectares. The average yield is 53.8 qq ha⁻¹, far below the optimum yield (80 qq ha⁻¹). In Chile rice is grown in areas where low temperatures ($T < 20^{\circ}\text{C}$) limit the yield of the crop. The Chilean rice varieties belong to the japonica rice group which is tolerant to cold in the early stages of development. Three rice varieties, Oro, Diamante-INIA, Ámbar-INIA and a new line in the pipeline for release (Harika), were exposed to five different water temperature regimes. In order to assess the effect on yield of the cold induced nonviable pollen grains, three panicles were randomly collected from each variety in each plot at the flowering stage. The anthers of two spikelets from each panicle were sampled and macerated to release the pollen grains on a slide. The pollen grains were stained with iodine to assess their viability and photographed under a microscope. The percentage of nonviable pollen grains (IPP) was obtained through image analysis. IPP was correlated to spikelet sterility at harvest (percent vanazón, PV) and to grain yield. The IPP and the other two parameters PV and grain yield were not significantly correlated but a significant and negative correlation between PV and grain yield was found, being Harika and Oro the varieties having the lowest PV and the highest grain yield in all water temperature regimes, placing these varieties as a very good alternative in areas where the water temperature does not exceed 20°C.

Keywords: *Oryza sativa L.*, pollen grains, cold damage, spikelet sterility.

INTRODUCCIÓN

El arroz es el alimento básico predominante en 17 países de Asia y el Pacífico, 9 países de América del Norte y del Sur y 8 países de África. Este cereal proporciona el 20% del total de energía alimentaria del mundo, en tanto que el trigo suministra el 19 % y el maíz, el 5% (FAO, 2004). A nivel mundial, el arroz ocupa el segundo lugar después del trigo en cuanto a superficie cosechada, pero si se considera su importancia como cultivo alimenticio, el arroz proporciona más calorías por hectárea que cualquier otro cultivo de cereales. En Chile ocupa el cuarto lugar en superficie entre los cereales cultivados con 24.527 hectáreas, que producen 127.311 toneladas, alcanzando un rendimiento promedio de 53,8 qq ha⁻¹ (ODEPA, 2010). La región del Maule concentra cerca del 80% del cultivo nacional.

El arroz es un cultivo de zonas tropicales y subtropicales, es vulnerable al frío, presentando diferentes problemas si es expuesto a bajas temperaturas en los distintos estados de desarrollo (Cuadro 1), siendo particularmente susceptible a sufrir daños por frío en dos momentos dentro de su etapa reproductiva, el inicio de panícula (IP) y el inicio de la diferenciación del polen (IDP).

Cuadro 1. Daños en el cultivo de arroz por bajas temperaturas

Crecimiento y desarrollo de la planta	Baja Temperatura		T° óptima (°C)
	(°C)	Efecto	
Germinación	10	Inhibición.	20 – 35
Emergencia de plántula	12 – 13	Demorada.	25 – 30
Enraizamiento	16	Raquitismo.	25 – 28
Hoja	7 – 12	Decoloración, raquitismo	31
Macollaje	9 – 16	Reducido.	25 – 31
Iniciación de panícula (IP)	15	Demorada.	—
Diferenciación de la panícula	15 – 20	Degeneración de ápice, Esterilidad de espiguilla.	—
Exerción de la panícula	22	Exerción incompleta, floración demorada.	30 – 33
Grano	12- 18	Madurez irregular.	20 – 25

Fuente: FAO, 2003

Angus y Lewin (1991) señalan que el daño por frío en la etapa reproductiva del arroz, sobre todo por bajas temperaturas nocturnas, limita el rendimiento en las zonas templadas de todo el mundo. El International Rice Research Institute (IRRI) ha clasificado a Chile dentro del grupo climático VI B, grupo que tiene temperaturas inferiores a las requeridas por el cultivo durante todo el periodo de desarrollo, entre los meses de Octubre a Marzo. Este hecho limita a los productores nacionales a obtener sólo una cosecha anual (Alvarado, 2002), con rendimientos inferiores a los 80 qq ha⁻¹ que son considerados óptimos.

La etapa reproductiva del arroz comienza con el inicio de la elongación de la panícula, la que coincide con la elongación del tallo. A este momento se le conoce como inicio de panícula (IP) y se reconoce visualmente al inspeccionar y disectar macollos a la altura del punto de unión del tallo y las raíces, cuando la panícula tiene entre 1 a 2 mm de longitud. Si la panícula ha comenzado a formarse se verá un pequeño brote blanco (Anexo I). La emisión de la panícula ocurre alrededor de 30 días después del inicio de panícula y la antesis comienza cuando se emite la panícula (Universidad de Filipinas, 1975).

El inicio de diferenciación del polen (IDP) ocurre aproximadamente 10 a 15 días después del inicio de panícula y es imperceptible al ojo desnudo por lo que se le relaciona con el momento en que el nudo de la hoja bandera se alinea con el nudo de la última hoja (Yoshida, 1981) (Anexo II). La baja temperatura (inferior a 20°C) del agua y del aire durante IDP, es considerada como la principal responsable de la esterilidad floral, siendo el momento de desarrollo de las microsporas en su primera etapa, como tétrada, después de la meiosis, el estado más susceptible al daño por frío (Nishiyama, 1995) (Figura 1). Los mecanismos por los cuales este fenómeno ocurre aún no se conocen claramente pero una de las teorías propuestas señala que en el proceso de daño por frío las anteras se reducen y las células del tapetum, que rodean el interior de las anteras y que son las responsables de la transferencia de nutrientes para el desarrollo del polen, se hipertrofian y, eventualmente, se rompen (Imin *et al.* 2005). Como resultado de ello, no se produce un desarrollo normal de los granos de polen, éstos contienen poco o nada de almidón y son funcionalmente estériles. Se estima que temperaturas del aire inferiores a 12° C por más de 5 horas durante el IDP, provocan esterilidad en las panículas (Tinarelli, 1989). Según Alvarado (1996) la esterilidad se incrementa en un 6% por cada grado de disminución de temperatura bajo 20°C.

Gunawardena *et al.* (2003) encontraron que bajas temperaturas en estados muy tempranos de la etapa reproductiva, es decir, en la etapa de diferenciación de células madres del polen y en el pico del desarrollo del grano de polen (etapa de segunda división meiótica-etapa temprana de formación de exina, que es la pared externa del grano de polen), causaron una severa reducción en la producción de polen fértil. Las anomalías citológicas e histológicas en plantas de arroz tratadas con frío son mayores en anteras que en pistilos u otro órgano de la flor, y el daño por frío puede revertirse por polinización artificial con polen sano (Satake, 1970).

Existen muy pocos antecedentes, en Chile, sobre el efecto de los factores ambientales y del manejo en relación a la esterilidad floral en variedades de arroz cultivadas a nivel nacional.

El objetivo de esta memoria fue estudiar el grado de esterilidad floral, en términos de la viabilidad del grano de polen y del porcentaje de vanazón de la semilla cosechada, que se produce por efecto de la temperatura del agua, la cual está dada por la combinación entre la temperatura y altura de la lámina de agua y la temperatura del aire.

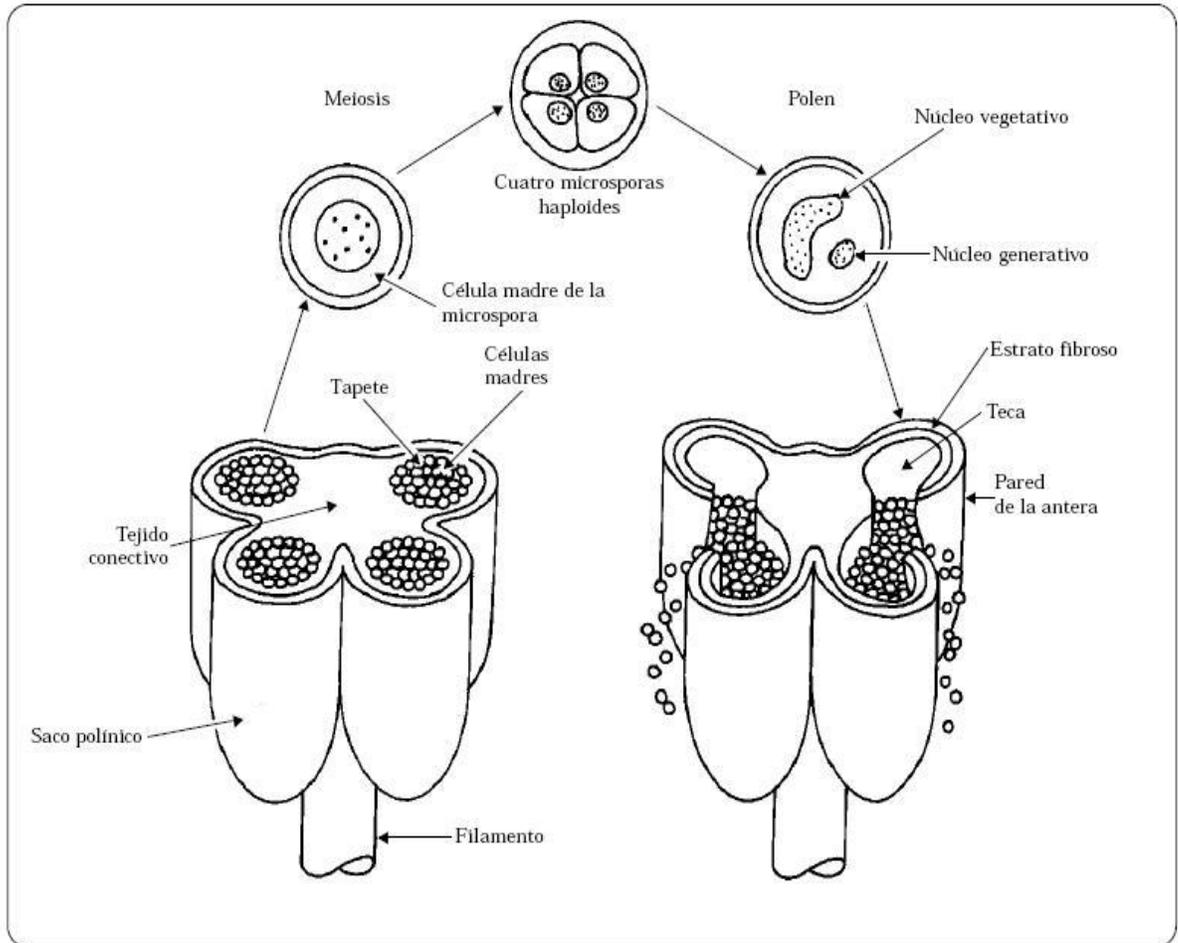


Figura 1. Diagrama de una antera de arroz y del desarrollo de los granos de polen. Fuente: Lentini *et al.*, 1997.

Hipótesis

Las variedades de arroz cultivadas en Chile difieren en la susceptibilidad a bajas temperaturas debido a cambios en la viabilidad de los granos de polen.

Objetivo general

Determinar el efecto de la temperatura de la lámina de agua sobre la esterilidad floral de cuatro variedades de arroz.

Objetivos específicos

- 1) Evaluar bajo microscopio el porcentaje de granos de polen viable en estado de anthesis, en cuatro variedades de arroz sometidas a diferentes temperaturas de lámina de agua.
- 2) Relacionar viabilidad del polen con la esterilidad floral determinada a cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la estación experimental del Campus Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago ($33^{\circ}40'$ latitud Sur y $70^{\circ}38'$ longitud Oeste), entre los meses de Octubre del 2008 y Marzo del 2009. El clima de la región es de tipo templado mesotermal estenotérmico mediterráneo, semiárido. El régimen térmico se caracteriza por veranos calurosos y secos e inviernos fríos. La temperatura media durante el periodo de crecimiento del arroz (Octubre a Marzo) es de $16,6^{\circ}\text{C}$, con una media máxima de $25,4^{\circ}\text{C}$ y media mínima de $9,5^{\circ}\text{C}$ (Santibáñez y Uribe, 1990). El régimen hídrico es de precipitación invernal con media anual de 330 mm y un período seco de 8 meses (Septiembre a Abril). El suelo es de origen aluvial y pertenece a la Serie Santiago (CIREN CORFO, 1996). La fracción de suelo usada para este ensayo correspondió al suelo superficial (primeros 30 cm), el que tiene textura franco arcillosa, con 2,3% de materia orgánica y pH 8,2.

La investigación se realizó bajo condiciones semicontroladas, utilizando un sistema de piscinas similar al descrito por Farrell *et al.* (2004). En él, fue posible someter a las plantas de arroz a diferentes condiciones térmicas en diferentes estados fenológicos del cultivo.

Establecimiento del ensayo

Para establecer el ensayo se usaron 10 piscinas de fibra de vidrio de 1,8 m de diámetro y 50 cm de alto que correspondieron a las parcelas, las que fueron rellenas con $0,636\text{ m}^3$ de suelo tamizado a 10 mm. y fumigado con Bromuro de Metilo (3 días de exposición al bromuro y 2 días de aireación), obteniéndose así un sustrato homogéneo libre de malezas y plagas.

Para mantener el cultivo en condiciones de inundación, se usó agua proveniente de un pozo de 140 m. de profundidad con una temperatura de salida de aproximadamente 14°C . Para conocer la temperatura del agua se usaron sensores de temperatura (termistores) ubicados en la lámina de agua. Los datos registrados fueron almacenados en un dispositivo electrónico, “data logger”, y extraídos semanalmente. Los datos de temperatura del aire, fueron obtenidos de los registros proporcionados por el Centro Experimental La Platina, INIA.

La fertilización se calculó para un rendimiento de 80 qq ha^{-1} , considerado muy bueno para este cultivo (Matus *et al.*, 2001) y según el análisis de suelo hecho previo a la siembra. Para las condiciones del suelo usado se fertilizó con 68 unidades ha^{-1} de N en forma de urea, aplicados en forma parcializada, 50% de la dosis 2 días antes de sembrar y el 50% restante en inicio de macolla. También se fertilizó con 61 unidades ha^{-1} de P_2O_5 en forma de súper fosfato triple y con 60 unidades ha^{-1} de K_2O en forma de cloruro de potasio. Ambas dosis

aplicadas en su totalidad 2 días antes de sembrar.

La siembra se realizó con semilla pre germinada en dosis de 140 kg ha^{-1} para obtener una densidad de 250 a 350 plantas m^{-2} . Para desinfectar las semillas, éstas fueron remojadas durante 24 horas, dentro de bolsas plásticas con orificios, en una solución de agua con cloro al 1%. Transcurrido ese tiempo, se sacaron de la solución y se mantuvieron en invernadero (incubación) hasta su germinación.

Una hora antes de sacar las semillas del invernadero para sembrarlas, se removió manualmente el suelo previamente inundado y fertilizado, para homogeneizarlo. Posterior a esto se procedió a dividir la superficie a sembrar de cada piscina, en cuatro partes iguales, y en cada cuarto se estableció una de las cuatro variedades (Figura 2). La forma de siembra fue manual y al voleo.

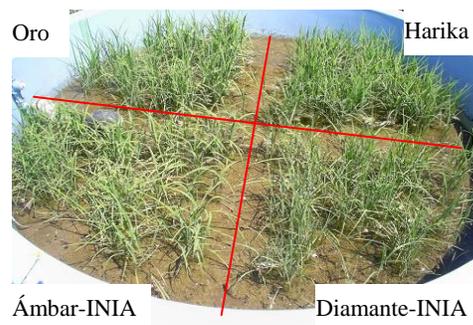


Figura 2. Distribución de las cuatro variedades de arroz (Harika, Diamante-INIA, Oro y Ámbar-INIA) en una parcela (piscina).

Condiciones Térmicas.

Para mantener una determinada condición térmica se manejó la altura y temperatura de la lámina de agua en las piscinas. Cada piscina contó con una entrada de agua regulada por una válvula de admisión lateral, con flotador, que cortaba la entrada de agua cuando ésta alcanzaba una determinada altura, según tratamiento. Por el costado de cada piscina se hizo un orificio a nivel de la superficie del suelo para drenar el agua. Los orificios fueron confeccionados con tuberías de 20 mm de diámetro y fueron equipados con una llave de paso para accionar o cortar la salida del agua, según se requirió. El **agua fría** (inferior a 20°C durante el día e inferior a 12°C durante la noche, aproximadamente), se obtuvo del pozo de 140 m de profundidad, y se mantuvo fría al estar fluyendo y renovándose constantemente a través de riego y drenaje. El **agua cálida** (superior a 20°C en el día y superior a 12°C durante la noche), correspondió a aquella proveniente del mismo pozo, pero que se mantuvo sin circular en las piscinas (sólo se repuso lo perdido en evapotranspiración) y que por efecto de la radiación solar y la temperatura del aire alcanzó mayor temperatura.

Las condiciones térmicas fueron aplicadas en distintas fases fenológicas del cultivo (Figura 3). **Fase 1:** Desde emergencia del cultivo hasta inicio de macolla (durante los primeros 30 días luego de la siembra). **Fase 2:** desde inicio de macolla hasta inicio de panícula (IP). **Fase 3:** Desde IP hasta el 50% de floración. **Fase 4:** Desde 50% de floración hasta cosecha (en esta fase ocurre el llenado de granos).

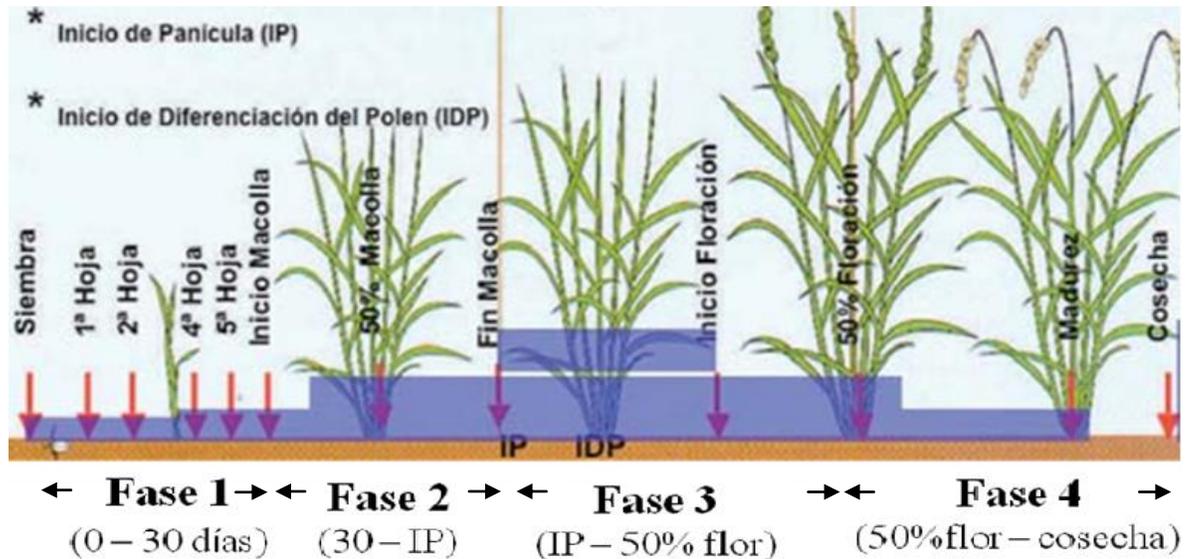


Figura 3. Esquema de las diferentes fases fenológicas del cultivo de arroz. Fuente: Fundación Chile, 2008.

El manejo del agua en la piscina se mantuvo considerando el momento de IP de la variedad más temprana hasta la floración de la variedad más tardía. La fecha en que ocurrió un determinado estado de desarrollo se definió cuando aproximadamente el 50% de los macollos se encontró en ese estado.

Las condiciones térmicas se describen a continuación (Cuadro 2):

ACB/ACV/ACA/ACA: Lámina de agua cálida (AC) ($T^{\circ} > 20^{\circ}\text{C}$) a baja altura (B) (5 cm.) en fase 1; en fase 2 altura variable (V) conforme va creciendo la planta, hasta alcanzar una lámina de agua alta (A) (20 cm.), a partir de IP hasta cosecha. En esta condición el agua usada en todo momento es cálida, para así mantener protegida a la panícula en todo su desarrollo hasta que se forma el grano de polen.

AFB/ACB/ACB/ACB: Lámina de agua fría (AF) ($T^{\circ} < 20^{\circ}\text{C}$) a baja altura (5 cm.) durante la fase 1 y desde la fase 2 hasta cosecha agua cálida a baja altura. En esta condición la viabilidad del grano de polen se ve afectada en caso de presentarse temperaturas del aire bajo 20°C desde IP a 50% floración (fase 3) ya que el agua, por su baja altura, no ejerce un efecto tampón que proteja a la panícula en formación durante esa etapa.

AFB/ACV/ACA/ACA: Lámina de agua fría y baja durante la fase 1 y luego lámina de agua cálida con altura variable en fase 2, hasta alcanzar una lámina de agua alta a partir de IP hasta cosecha. Este es el manejo estándar que se le da al arroz en condiciones de campo y corresponde al testigo.

ACB/ACB/AFB/ACB: Lámina de agua cálida y baja en fases 1 y 2; en fase 3 lámina de agua fría y baja que mantenga a las raíces en un ambiente frío, y en fase 4 lámina de agua cálida y baja. La lámina de agua ejerce un efecto tampón hasta que los puntos de crecimiento del cultivo superan los 5 cm. de altura. Luego de este punto, la temperatura del aire, junto con la temperatura del agua, determinan la viabilidad de los granos de polen en formación y el posterior desarrollo de los granos.

ACB/ACV/AFA/ACA: Lámina de agua cálida y baja durante la fase 1; lámina de agua cálida y altura variable en fase 2; en fase 3 lámina de agua fría y alta; y en fase 4 lámina de agua cálida y alta. Este tratamiento mantiene estresada a la panícula en formación durante la etapa reproductiva. La viabilidad de los granos de polen depende en menor medida de los efectos de la temperatura del aire y en mayor medida de la temperatura del agua.

Cuadro 2. Condiciones térmicas dadas a las cuatro variedades de arroz.

Condición Térmica	Fase del cultivo	T° de la lámina de agua	Altura de la lámina de agua
ACB/ACV/ACA/ACA	1	Cálida	5 cm
	2	Cálida	Variable
	3	Cálida	20 cm
	4	Cálida	20 cm
AFB/ACB/ACB/ACB	1	Fría	5 cm
	2	Cálida	5 cm
	3	Cálida	5 cm
	4	Cálida	5 cm
AFB/ACV/ACA/ACA	1	Fría	5 cm
	2	Cálida	Variable
	3	Cálida	20 cm
	4	Cálida	20 cm
ACB/ACB/AFB/ACB	1	Cálida	5 cm
	2	Cálida	5 cm
	3	Fría	5 cm
	4	Cálida	5 cm
ACB/ACV/AFA/ACA	1	Cálida	5 cm
	2	Cálida	Variable
	3	Fría	20 cm
	4	Cálida	20 cm

Diseño de Experimentos y Tratamientos.

Se distribuyeron 5 condiciones térmicas y 4 variedades de arroz en un diseño de Parcelas divididas con 2 repeticiones. La parcela principal (piscina) correspondió a la condición térmica y la variedad de arroz a la subparcela (dentro de cada piscina). Las variedades de arroz evaluadas fueron Diamante-INIA, Ámbar-INIA, Oro y Harika. Esto generó un total de 20 tratamientos (5 condiciones térmicas x 4 variedades) (Cuadro 3). Un esquema de cada una de las condiciones térmicas se presenta en el Apéndice I.

Cuadro 3. Tratamientos establecidos en el ensayo

Tratamiento	Variedad	Condiciones Térmicas
1	Harika	
2	Diamante-INIA	ACB/ACV/ACA/ACA
3	Oro	
4	Ámbar-INIA	
5	Harika	
6	Diamante-INIA	AFB/ACB/ACB/ACB
7	Oro	
8	Ámbar-INIA	
9	Harika	
10	Diamante-INIA	AFB/ACV/ACA/ACA
11	Oro	
12	Ámbar-INIA	
13	Harika	
14	Diamante-INIA	ACB/ACB/AFB/ACB
15	Oro	
16	Ámbar-INIA	
17	Harika	
18	Diamante-INIA	ACB/ACV/AFA/ACA
19	Oro	
20	Ámbar-INIA	

Mediciones

Evaluación del rendimiento

El rendimiento (REND) se obtuvo de la cosecha de la totalidad de la subparcela. Del manojo cosechado se separaron 50 tallos con panícula, los que se pesaron en fresco (FS). El resto del manojo (sin los 50 tallos con panícula) también fue pesado en fresco (FB) y luego se trilló para así obtener el peso de la totalidad de sus granos (TG). Posterior a esto, del total de granos, se separaron 250 granos de los cuales se obtuvo el peso fresco (WG) y el peso seco (DG). Con estos datos se calculó el rendimiento para cada subparcela a través de la siguiente fórmula:

$$\text{REND (Kg/ha)} = \frac{(\text{DG}/\text{WG}) \text{ TG } [(\text{FB}+\text{FS})/\text{FB}] \times 10}{0,636 \text{ m}^2}$$

Evaluación de la esterilidad floral

La esterilidad floral fue medida en dos momentos dentro del ciclo de vida del arroz. En antesis, a través del porcentaje de granos de polen inviable (PPI) y en cosecha, a través del porcentaje de vanazón de los granos (PV).

Evaluación de la viabilidad de los granos de polen. Entre el 13/01/09 y el 26/01/09 (antesis) se midió el porcentaje de inviabilidad de los granos de polen (PPI) de cada tratamiento. Para ello se seleccionaron al azar 3 panículas de cada variedad de arroz en cada parcela (Figura 4). De la zona media de cada panícula seleccionada se eligieron 2 espiguillas, y de cada espiguilla 2 anteras. Las 4 anteras seleccionadas fueron llevadas a un tubo de ensayo con 4 ml de buffer de acetato de sodio (pH=5), generándose así una suspensión. En total se obtuvieron 120 suspensiones a analizar (3 suspensiones x 4 variedades x 5 parcelas x 2 repeticiones) las que se dejaron reposar durante toda la noche en baño maría a 37°C (modificado de Fox *et al.*, 2001). Al día siguiente, las anteras fueron llevadas a una solución compuesta por una gota de agua desmineralizada y una gota de lugol y se maceraron para que liberasen el polen. Hecho esto se procedió, mediante el uso de un cuenta-gotas, a succionar la solución para llevarla a un portaobjeto. En estas condiciones las preparaciones se observaron bajo un microscopio y se obtuvieron imágenes digitalizadas (Figura 5) que se analizaron utilizando la herramienta de software SigmaScan Pro 5, que permite identificar los granos de polen viables a través del color. Los granos viables son aquellos que contienen almidón, tornándose oscuros en presencia de lugol. Para obtener un contraste entre el polen viable y el resto, la imagen fue transformada ingresando parámetros de intensidad de 0 a 100, para la detección de polen viable y de 0 a 135 para la totalidad de polen en la imagen (Aresti, 2008).

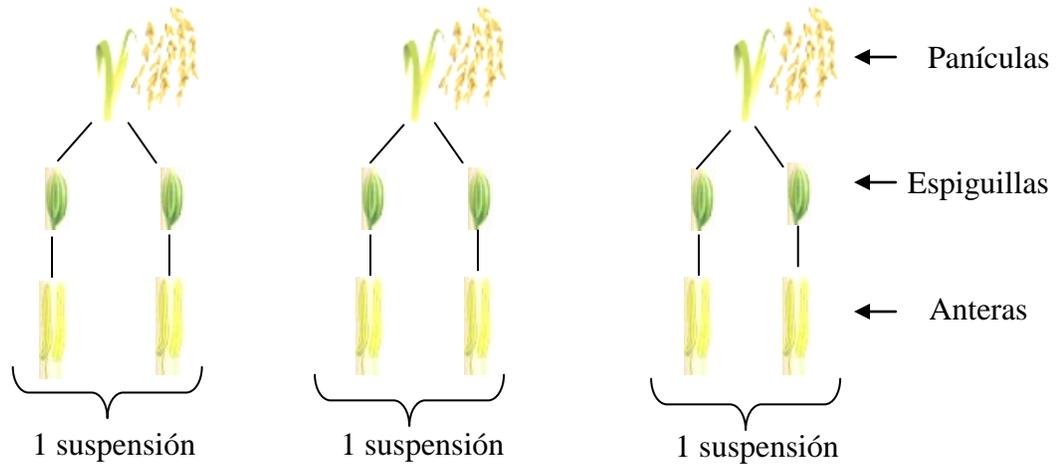


Figura 4. Esquema de muestreo de polen de una variedad en antesis proveniente de una parcela.

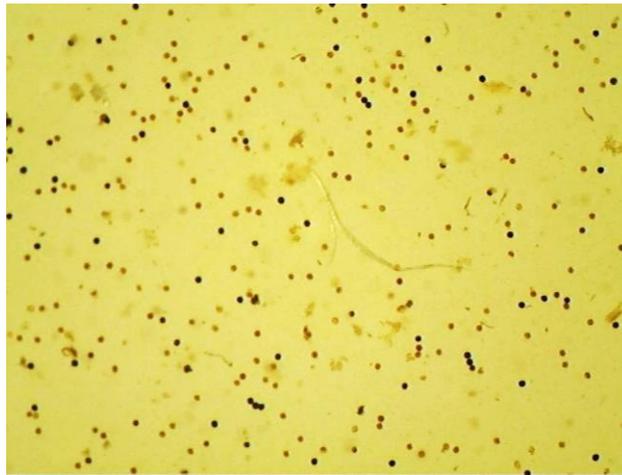


Figura 5. Imagen digitalizada de una suspensión de polen bajo microscopio. Granos de polen viable se observan de color café oscuro por tinción con lugol.

Evaluación del porcentaje de vanazón. En cosecha se midió el porcentaje de vanazón (PV). Para ello se cosecharon 10 panículas al azar de cada tratamiento. Las panículas fueron trilladas manualmente y los granos secados a estufa hasta llegar a peso constante, luego se procedió al pesaje de los granos vanos (PGV) y totales (PGT), para calcular con esos datos el porcentaje de vanazón según la siguiente fórmula:

$$PV (\%) = (PGV * 100) / PGT$$

RESULTADOS

Condiciones Térmicas

Las 5 condiciones térmicas se diferenciaron por la temperatura que alcanzó el agua de inundación del arroz, en cada fase fenológica del cultivo (Cuadro 4). La temperatura del agua en cada tratamiento estuvo determinada por la altura de la lámina de agua, el recambio de ésta y la temperatura ambiental. En **ACB/ACV/ACA/ACA** la temperatura de la lámina de agua, en promedio entre del día y la noche, para todas las fases fenológicas del cultivo se mantuvo cálida ($T^{\circ} > 20^{\circ}\text{C}$), con una lámina de agua que fue aumentando en altura conforme fueron creciendo las plantas, no así en **AFB/ACB/ACB/ACB** y **AFB/ACV/ACA/ACA** en las cuales se mantuvo estresadas a las plantas con una lámina de agua fría ($T^{\circ} < 20^{\circ}\text{C}$) y baja (5 cm.) desde que éstas emergieron hasta que comenzaron a macollar (fase 1), lo cual afectó el normal desarrollo de las plantas en ese periodo, observándose una menor población de plantas y clorosis en las hojas.

Por otro lado en **ACB/ACB/AFB/ACB** y **ACB/ACV/AFA/ACA** se mantuvo estresadas a las plantas con agua fría desde que comienza a formarse la panícula (IP) hasta 50% de floración, periodo en el se lleva a cabo el proceso de desarrollo de los granos de polen en las anteras. Pero en el caso de **ACB/ACB/AFB/ACB** la altura de la lámina de agua fría fue baja, por lo que su influencia estuvo presente sólo a nivel de raíces y en los primeros 5 cm basales de los tallos, en cambio en **ACB/ACV/AFA/ACA** la altura de la lámina de agua fría fue alta, quedando sumergidas las panículas en formación en esta condición de estrés.

Las 5 condiciones térmicas tuvieron agua cálida desde inicio de macolla hasta IP (fase 2), aunque con diferentes alturas de la lámina de agua. Al igual que en la fase 4, periodo en el que los granos comienzan a llenarse y pasan de un estado lechoso a un estado duro, quedando listos para ser cosechados.

Cuadro 4. Detalle de las temperaturas semanales del agua (°C), para cada condición térmica, y de la temperatura del aire (°C)

Semana	Fase	T° Amb.	Condiciones térmicas				
			ACB/ACV/ ACA/ACA	AFB/ACB/ ACB/ACB	AFB/ACV/ ACA/ACA	ACB/ACB/ AFB/ACB	ACB/ACV/ AFA/ACA
1		16,2	21	18,5	19,5	20,6	20,3
2		16,3	19	17	17,4	19,1	18,5
3	1	16,3	20,6	18,2	17,7	21,2	20,5
4		16,4	21,7	17,4	17,4	21,1	22,3
5		19	22,8	19,2	19,3	22,2	23,4
Media		16,8	21	18,1	18,3	20,8	21
6		18,7	23,4	22,8	22,9	22,7	24,5
7		18,5	23,3	23,1	22,5	23,4	23,7
8		18	22,2	23,4	21,9	23	22,5
9	2	19,6	22,8	23,3	23,2	23,6	23,4
10		18,8	21,6	22,7	22,5	22,4	21,5
11		19,3	22,3	24,8	24,8	24,1	23,2
12		21,2	23,4	25,1	25,4	25	24,9
Media		19,2	22,7	23,6	23,3	23,5	23,4
13		20,9	22,5	24,7	24,1	20,2	20,4
14		21	21,8	23,8	23,6	18,9	19,5
15	3	20,7	21,3	23,3	23	19,2	18,6
16		21,3	20,8	22	21,9	20	18,6
17		19,2	19,9	21,3	21,2	18,2	17,8
Media		20,6	21,3	23	22,8	19,3	19
18		21,2	20,7	22,8	22,1	23	20,1
19		19,3	21,3	22,2	21,9	22	20,3
20		19,7	20,6	21	21,1	21,5	19,8
21	4	s/d	20	20,5	20,5	20,8	20
22		s/d	21,4	21,9	21,9	22,6	21,1
23		s/d	19,5	21,1	21,1	21,2	19,7
Media		20,1	20,6	21,6	21,4	21,9	20,2

Evaluación del Rendimiento

El rendimiento tuvo diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) para las variables condición térmica y variedad (Cuadro 5), no habiendo interacción. El mejor rendimiento se obtuvo en las condiciones térmicas en que las plantas de arroz estuvieron sometidas a una

lámina de agua cálida desde IP en adelante, siendo aún mayor el rendimiento, cuándo la lámina de agua además de ser cálida en esa fase, fue alta (ACB/ACV/ACA/ACA y AFB/ACV/ACA/ACA). Al contrario de las plantas sometidas a una lámina de agua fría, ya sea alta o baja, desde IP hasta 50% de floración, en las cuales se obtuvieron los menores rendimientos. Aunque todos sobre el rendimiento promedio del país.

Por otra parte de las cuatro variedades estudiadas, Oro y Harika fueron las que tuvieron el mayor rendimiento (>90 qq ha⁻¹), y Diamante-INIA, la variedad más sembrada en Chile, junto a Ámbar-INIA, las que tuvieron el menor rendimiento (<78 qq ha⁻¹), siendo éste inferior al considerado bueno para este cultivo.

Cuadro 5. Rendimiento (qq ha⁻¹) de las cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas.

Condición Térmica	Variedad				
	Harika	Diamante-INIA	Oro	Ámbar-INIA	Media gral.
ACB/ACV/ACA/ACA	97,7 aB	100,0 aCD	111,2 aA	76,5 aB	96,4 C
AFB/ACB/ACB/ACB	94,4 aB	62,4 aB	87,7 aA	67,1 aAB	77,9 AB
AFB/ACV/ACA/ACA	127,6 aC	82,0 aC	107,6 aA	78,9 aB	99,0 BC
ACB/ACB/AFB/ACB	67,4 aA	102,3 bD	55,5 aA	52,1 aAB	69,3 A
ACB/ACV/AFA/ACA	114,8 bC	42,7 aA	106,3 bA	35,5 aA	74,8 A
Media gral.	100,4 b	77,9 ab	93,7 b	62,0a	83,5

Condición térmica *

Variedad ***

Condición térmica*Variedad Ns

Coefficiente de Variación 2,64%

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas. ns = no significativo; *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; † $P < 0,1$.

Evaluación de la esterilidad floral

Evaluación de la viabilidad de los granos de polen.

Los Cuadros 6 y 7 muestran las medias para el número de granos de polen viables (NPV), y el número granos de polen totales (NPT) (detalle en Apéndice II), con lo cual se estimó el porcentaje de polen inviable (PPI) (Cuadro 8) para las cuatro variedades de arroz evaluadas. La interacción Condición Térmica x Variedad fue significativa sólo al 10% ($p \leq 0,1$) para el porcentaje de polen inviable indicando que las diferentes variedades reaccionaron en forma diferente a las condiciones térmicas a este nivel de probabilidad.

La variable NPV se afectó significativamente ($p \leq 0,05$) sólo por la condición térmica, obteniéndose un menor número de granos de polen viable en las condiciones térmicas en que las plantas fueron sometidas a una lámina de agua baja en todas las fases fenológicas del cultivo (AFB/ACB/ACB/ACB y ACB/ACB/AFB/ACB). Este número fue aún menor cuando además de una lámina de agua baja, ésta fue fría en la fase que va desde IP hasta 50% de floración (ACB/ACB/AFB/ACB). La variable NPT no se vio significativamente afectada ni por la variedad, ni la condición térmica del agua.

Cuadro 6. Número de granos de polen viable (NPV) de las cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas.

Condición Térmica	Variedad				Media gral.
	Harika	Diamante-INIA	Oro	Ámbar-INIA	
ACB/ACV/ACA/ACA	59,0 aA	65,0 Aab	99,0 aA	73,5 aA	74,1 AB
AFB/ACB/ACB/ACB	98,5 aA	44,5 Aa	71,0 aA	79,5 aA	73,4 AB
AFB/ACV/ACA/ACA	121,5 aA	153,0 Ac	114,5 aA	96,0 aA	121,3 C
ACB/ACB/AFB/ACB	66,5 aA	29,0 Aa	75,5 aA	61,0 aA	58 A
ACB/ACV/AFA/ACA	67,0 aA	130,5 Abc	98,0 aA	97,5 aA	98,25 BC
Media gral.	82,5 a	84,4 a	91,6 a	81,5 a	85,01
Condición térmica	*				
Variedad	ns				
Condición térmica*Variedad	ns				
Coefficiente de Variación	49,43%				

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas. ns = no significativo; *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; † $P < 0,1$

Cuadro 7. Número de granos de polen totales (NPT) de las cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas

Condición Térmica	Variedad				Media gral
	Harika	Diamante-INIA	Oro	Ámbar-INIA	
ACB/ACV/ACA/ACA	221 aB	216 aA	227 aA	206 aA	217,3 A
AFB/ACB/ACB/ACB	187 aB	211 aA	194 aA	276 aA	216,8 A
AFB/ACV/ACA/ACA	229 abB	265 bA	184 aA	223 abA	225,0 A
ACB/ACB/AFB/ACB	75 aA	133 abA	195 bA	138 abA	135,3 A
ACB/ACV/AFA/ACA	185 aB	238 aA	213 aA	169 aA	201,0 A
Media gral.	179,3 a	212,4 a	202,3 a	202,2 a	199,1

(Continúa)

Cuadro 7. (Continuación)

Condición térmica	ns
Variedad	ns
Condición térmica*Variedad	ns
Coefficiente de Variación	26,18%

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas. ns = no significativo; *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; † $P < 0,1$

Al analizar el porcentaje de polen inviable (PPI), se observa que de las cuatro variedades de arroz estudiadas, Oro y Ámbar-INIA, presentaron un comportamiento estable y estadísticamente similar en todas las condiciones térmicas a las que fueron sometidas. A diferencia de Harika y Diamante-INIA, las cuales presentaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al porcentaje de polen inviable, dependiendo de la condición térmica a la que fueron expuestas.

Harika tuvo los menores porcentajes de polen inviable (~45%) cuando fue sometida a una lámina de agua cálida, ya sea baja o alta, desde IP en adelante (estrés por agua fría desde la emergencia de las plántulas hasta el inicio de macolla); y los mayores porcentajes de polen inviable cuando el estrés por agua fría ocurrió desde IP hasta 50% flor. Habiendo para esta variedad, en esa fase, un efecto de la altura de la lámina de agua sólo cuando ésta es fría, ya que con una lámina de agua fría y baja se obtuvo mayor PPI (~84%) que con una lámina de agua fría y alta (~65%).

Por otro lado, en las plantas de arroz de la variedad Diamante-INIA, el PPI obtenido estuvo fuertemente influenciado por la altura de la lámina de agua, no siendo significativa la temperatura de ésta en las diferentes fases fenológicas del cultivo. Las plantas de las dos condiciones térmicas en que la altura de la lámina de agua fue baja en todo el ciclo de vida del cultivo, se comportaron estadísticamente iguales en cuanto al PPI entre ellas (~75%); y las plantas sometidas a una lámina de agua alta desde IP en adelante (ACB/ACV/ACA/ACA, AFB/ACV/ACA/ACA y ACB/ACV/AFA/ACA), aún cuando la temperatura de ésta fue diferente, presentaron los menores PPI (~50%). Con esto se puede afirmar que la variedad Diamante-INIA es altamente susceptible a la temperatura del aire, pues los mayores PPI se obtuvieron cuando las panículas estuvieron afuera del agua.

Al comparar el comportamiento de las cuatro variedades estudiadas, según el porcentaje de polen inviable obtenido, se puede observar que una lámina de agua alta que mantenga sumergida a la panícula cuando ésta se está desarrollando, y cuando se están formando los granos de polen (desde IP hasta 50% flor), produce menores PPI que una lámina de agua baja, independiente de la temperatura de ésta. Esto ocurre para todas las variedades exceptuando Harika, variedad que se vio favorecida con agua alta y cálida desde IP hasta 50% flor de la misma forma que con agua baja y cálida en esa fase.

Cuadro 8. Porcentaje de polen inviable (PPI, %) de las cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas.

Condición Térmica	Variedad				Media gral.
	Harika	Diamante-INIA	Oro	Ámbar-INIA	
ACB/ACV/ACA/ACA	72,5 aB	68,7 aBC	59,0 aA	66,7 aA	66,7 C
AFB/ACB/ACB/ACB	44,0 aA	74,9 bC	63,5 abA	66,4 abA	62,2 BC
AFB/ACV/ACA/ACA	45,2 aA	39,1 aA	37,0 aA	54,7 aA	44,0 A
ACB/ACB/AFB/ACB	84,1 bC	77,6 abC	63,2 aA	59,3 aA	71,1 C
ACB/ACV/AFA/ACA	65,8 Bb	48,0 abAB	57,7 abA	41,5 aA	53,2 AB
Media gral.	62,3	61,6	56,1	57,7	59,4

Condición térmica	**
Variedad	ns
Condición térmica*Variedad	†
Coeficiente de Variación	17,53%

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas. *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; † $P < 0,1$

Evaluación del porcentaje de Vanazón.

Con el peso de granos vanos (PGV) y el peso total de granos (PGT) se estimó el porcentaje de vanazón (PV) para las cuatro variedades analizadas (Apéndice III). Resultando significativa ($p \leq 0,05$) la interacción Condición térmica x Variedad para las 3 variables analizadas (Figura 6)

En las variedades Harika y Oro el PGV obtenido no tuvo diferencias estadísticamente significativas para las 5 condiciones térmicas, mientras que Diamante-INIA y Ámbar-INIA tuvieron un comportamiento de esta variable muy diferente dependiendo de la condición térmica a la que las plantas fueron sometidas, obteniéndose los menores pesos de granos vanos en las plantas sometidas a una lámina de agua cálida desde IP en adelante (ACB/ACV/ACA/ACA, AFB/ACB/ACB/ACB y AFB/ACV/ACA/ACA), no habiendo un efecto de la altura de esta lámina.

En el caso de PGT, los mayores valores se obtuvieron en la variedad Oro sometida a una lámina de agua alta, ya sea cálida o fría, desde IP hasta 50% de floración (ACB/ACV/ACA/ACA, AFB/ACV/ACA/ACA y ACB/ACV/AFA/ACA). A diferencia de la var. Diamante-INIA y Ámbar-INIA, en las cuales fue relevante, además de la temperatura de la lámina de agua, la altura de ésta, pues el mayor peso total de grano se obtuvo en plantas sometidas a una lámina de agua cálida y alta a partir de IP, pudiendo observarse un efecto de la temperatura a la que estuvo la panícula, ya que los menores valores de PGT se obtuvieron en aquellas condiciones térmicas que tuvieron desde IP hasta 50% de floración, una lámina de agua baja (AFB/ACB/ACB/ACB y

ACB/ACB/AFB/ACB) que dejó expuesta a la panícula a la temperatura del aire, o bien una lámina de agua alta pero fría, que mantuvo a la panícula sumergida en una condición de estrés.

Por el contrario, en plantas de arroz var. Harika, la temperatura a la que están las raíces parece tener más relevancia que la temperatura a la que se encuentra la panícula, ya que el menor PGT se obtuvo en aquellas plantas sometidas a una lámina de agua baja y fría desde IP hasta 50% de floración, mientras que una lámina de agua baja y cálida en esa misma fase genera altos valores de PGT.

Al analizar el porcentaje de vanazón obtenido en los diferentes tratamientos (Cuadro 9), se observa que para todas las variedades estudiadas, a excepción de Oro, los mayores porcentajes de vanazón se obtuvieron en las plantas sometidas a una lámina de agua fría, desde IP hasta 50% de floración. Las variedades Diamante-INIA y Ámbar-INIA tuvieron los más altos porcentajes de vanazón, independiente de la altura de la lámina de agua en esa fase. A diferencia de Harika, la cual presentó un alto PV sólo cuando la lámina de agua fría fue baja. Esto demuestra que en las variedades Diamante-INIA, Ámbar-INIA y Harika, el porcentaje de vanazón está determinado por la temperatura del agua en la etapa reproductiva (desde IP en adelante), en mayor medida que por la temperatura del aire. De hecho, en estas 3 variedades se obtuvieron bajos PV cuando en la etapa reproductiva la lámina de agua, a pesar de ser baja, fue cálida. En plantas de arroz variedad Oro, en cambio, los porcentajes de vanazón obtenidos fueron estadísticamente iguales y bajos (entre 1,64 y 2,85 %) en las 5 diferentes condiciones térmicas a las que fueron sometidas, posicionándola como una variedad altamente tolerante a la baja temperatura, ya sea a nivel de panícula o raíces, en todos las fases fenológicas del cultivo.

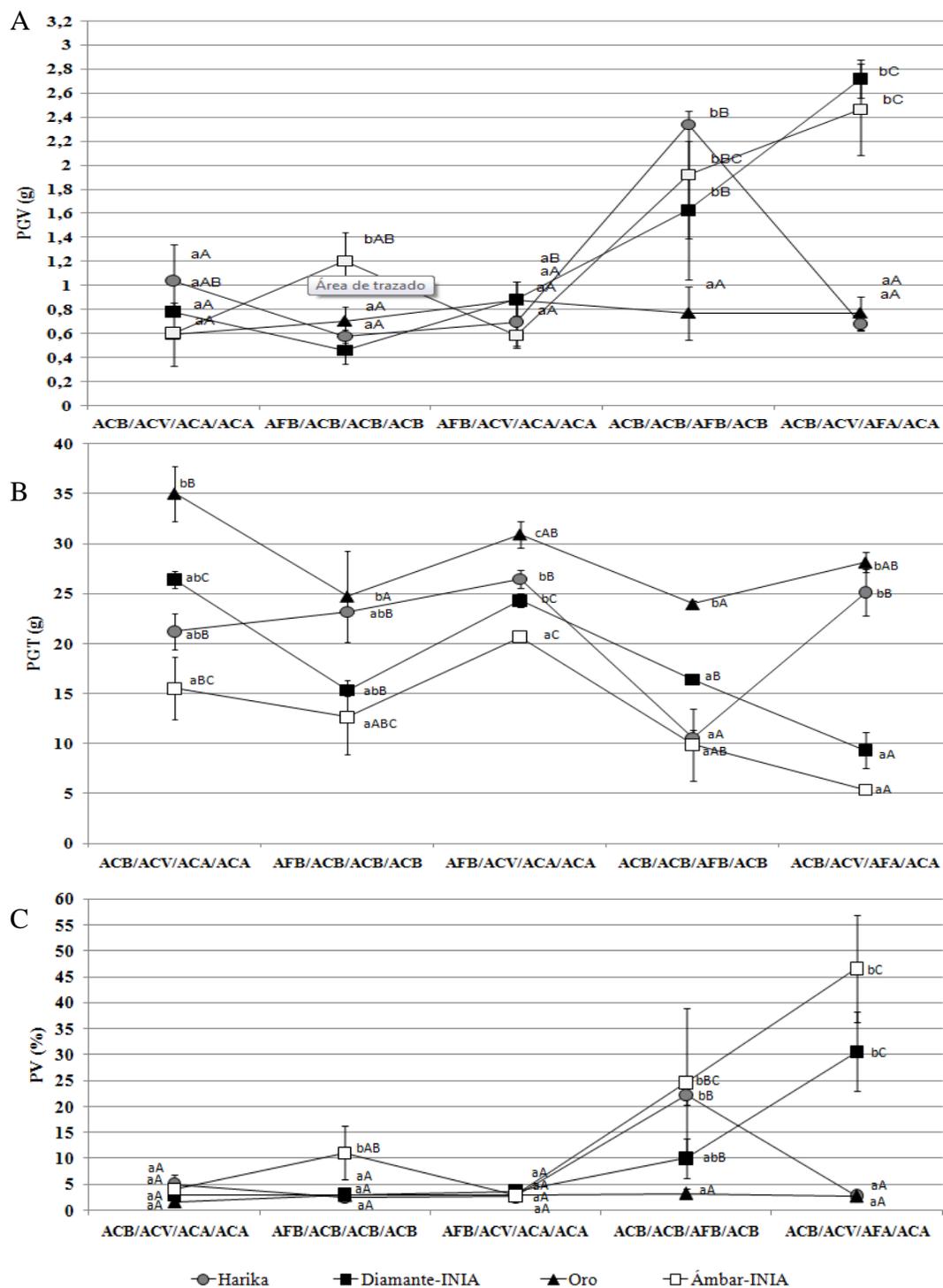


Figura 6. Gráficos de interacción Condición térmica*Variedad de las variables: peso granos vanos (A); peso granos totales (B) y porcentaje de vanazón (C). Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Barras indican el error estándar de las medias entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas.

Cuadro 9. Porcentaje de vanazón (PV,%) de las cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas

Condición Térmica	Variedades				
	Harika	Diamante-INIA	Oro	Ámbar-INIA	Media gral.
ACB/ACV/ACA/ACA	5,1 aA	3,0 aA	1,6 aA	4,1 aA	3,4 AB
AFB/ACB/ACB/ACB	2,5 aA	3,0 aA	2,9 aA	11,0 bAB	4,8 B
AFB/ACV/ACA/ACA	2,6 aA	3,7 aA	2,9 aA	2,8 aA	3,0 A
ACB/ACB/AFB/ACB	22,2 bB	10,0 abB	3,2 aA	24,6 bBC	15,0 C
ACB/ACV/AFA/ACA	2,8 aA	30,6 bC	2,7 aA	46,6 bC	20,7 C
Media gral.	7,0 b	10,1 b	2,7 a	17,8 c	9,4

Condición térmica	***
Variedad	***
Condición térmica*Variedad	**
Coefficiente de Variación	27,68%

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas. *** $P < 0,001$; ** $P < 0,01$; * $P < 0,05$; † $P < 0,1$

Análisis de correlación entre las variables rendimiento, porcentaje de polen inviable y porcentaje de vanazón.

El análisis de correlación entre la variable porcentaje de polen inviable (PPI) y las variables porcentaje de vanazón (PV) y rendimiento (REND) no fue significativo, lo que implica que, para las variedades de arroz cultivadas en Chile, no basta con conocer solamente la viabilidad de los granos de polen, para poder tener una estimación del rendimiento final a cosecha.

Por otro lado las variables PV y REND se relacionaron significativamente ($p \leq 0,0001$) y en forma negativa (Figura 7), es decir, a mayor porcentaje de vanazón, menor rendimiento.

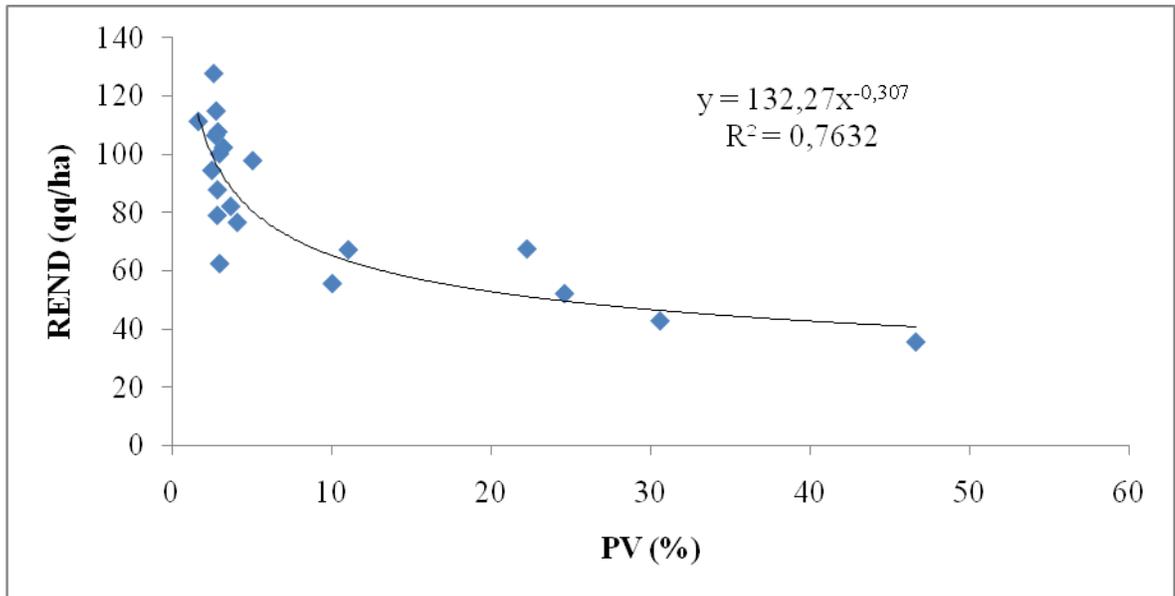


Figura 7. Correlación entre el porcentaje de vanazón (PV) y el rendimiento (REND) para las cuatro variedades en las cinco diferentes condiciones térmicas.

También se realizó un análisis de correlación entre el rendimiento y el porcentaje de vanazón para las condiciones térmicas y las variedades por separado, obteniéndose una relación altamente significativa entre REND y el PV sólo para la condición térmica ACB/ACV/AFA/ACA ($r = -0,89$; $p \leq 0,01$), al igual que para las variedades Harika ($r = -0,81$; $p \leq 0,01$) y Ámbar-INIA ($r = -0,82$; $p \leq 0,01$).

DISCUSIÓN

Temperaturas bajas, menores a 20°C, provocan la aparición de distintas alteraciones en el cultivo del arroz (Sthapit *et al.*, 1996), como crecimiento anormal o daños en las distintas partes de la planta, lo que depende del estado de desarrollo del cultivo y la duración e intensidad del período de frío (Shibata, 1979; Tinarelli, 1989; Sthapit *et al.*, 1996). Las plantas de arroz sometidas a una lámina de agua baja y fría desde la emergencia de las plántulas hasta inicio de macolla (fase 1) (AFB/ACB/ACB/ACB y AFB/ACV/ACA/ACA) además de presentar clorosis en hojas y tallos, tuvieron una menor población de plantas en relación a las plantas que en esa fase fueron sometidas a una lámina de agua baja y cálida. Esto es coincidente con resultados obtenidos por Yoshida *et al.* (1996) quienes observaron que al exponer plántulas de arroz del tipo Indica a frío (14 días a 15°C) las hojas emergentes carecían de pigmentos, puesto que la baja temperatura obstaculiza el crecimiento celular y el desarrollo de plastidios. Sin embargo, las cuatro variedades lograron sobreponerse a este estrés cuando se cambió la condición térmica del agua una vez cumplida la fase 1, pasando de una lámina de agua baja y fría a una lámina de agua cálida, baja o de altura variable, desde inicio de macolla hasta cosecha. Esta respuesta se observó al evaluar el porcentaje de vanazón y el rendimiento en las plantas sometidas a estas condiciones térmicas, pues en ellas se obtuvieron los menores porcentajes de vanazón y los mayores rendimientos, siendo éstos estadísticamente iguales a los obtenidos en las plantas sometidas a una lámina de agua cálida en todo el ciclo de desarrollo del cultivo (ACB/ACV/ACA/ACA). Los resultados coinciden con lo descrito por Sthapit *et al.* (1996), quienes observaron que temperaturas inferiores a 18°C durante el primer estado de crecimiento perjudican la germinación y establecimiento de las plantas de arroz, pero éstas pueden sobreponerse gracias a su gran capacidad de macollar. En cambio, según Alvarado (1999), si las temperaturas son inferiores a 20°C en la etapa reproductiva, la esterilidad floral puede verse incrementada desde un 12% hasta un 60%, provocando una pérdida de rendimiento irrecuperable.

En las plantas de arroz var. Ámbar-INIA y Diamante-INA sometidas a una lámina de agua fría, ya sea baja o alta, desde IP hasta 50% de floración (fase 3) hubo una mayor esterilidad floral en cosecha (PV) que en las plantas sometidas a una lámina de agua cálida. Este comportamiento, sin embargo, no se observó en las plantas de arroz var. Harika, las que sólo se vieron afectadas con una lámina de agua fría en esta fase cuando la altura de la lámina fue baja. Las plantas de arroz de la var. Oro no se vieron afectadas por las condiciones térmicas a las que fueron expuestas, obteniéndose en ellas bajos porcentajes de vanazón y el más alto rendimiento, pudiendo ser esta variedad una excelente alternativa en las zonas de veranos fríos en que ni la temperatura del agua ni la temperatura ambiental alcanzan valores superiores a 20°C, en la etapa en que se está desarrollando la panícula, como es el caso de la zona arrocera de Chile.

El hecho que las variedades tengan una respuesta diferente dependiendo de la temperatura a la que han sido expuestas, concuerda con los estudios de Satake (1978), quien comprobó

que la temperatura umbral para inducir daño por frío es dependiente del cultivar, pues con temperaturas ambientales nocturnas de 15°C por 4 días durante el estado de microspora joven se induce esterilidad floral en cultivares tolerantes al frío, considerando que 17-19°C son críticas para cultivares susceptibles.

Contrario a resultados obtenidos en la temporada 07/08 por Aresti (2008) en Parral, con las mismas variedades de este estudio, la esterilidad floral medida a cosecha no se correlacionó con la esterilidad floral medida en antesis. Cabe señalar que las relaciones de este autor muestran bajo coeficiente de correlación (R^2 entre 18,3% y 41,6%). Lo anterior significa que existen otros factores, además de la viabilidad del grano de polen que explican la esterilidad floral. Entre estos factores pueden estar los que afectan el crecimiento del tubo polínico tales como nutrientes, viento y temperatura, entre otros, o factores que afecten la viabilidad del gameto femenino. Por otra parte, existe un efecto muestreo ya que el porcentaje de granos de polen viable se determinó sobre unas pocas anteras que venían de tres panículas recolectadas en las parcelas, mientras que el porcentaje de vanazón se estimó a partir de una muestra de 10 panículas completas.

Por otra parte, se debe tener en cuenta el efecto medioambiental descrito por Kondo (1992) quien fue el primero en reconocer que la esterilidad inducida por las bajas temperaturas varía mucho entre los años, incluso cuando los tratamientos son idénticos.

Es necesario identificar y conocer las distintas variedades de arroz, con sus características fisiológicas y su comportamiento frente a las condiciones climáticas de la región, ya que se puede presentar tolerancia en algunos genotipos en condiciones de bajas temperaturas (Kim et al., 2008). Con esto, se puede aprovechar mejor el potencial de los suelos disponibles en la región para la siembra de arroz, alcanzando mayores beneficios económicos y reduciendo las pérdidas por daño por frío en el cultivo existente a nivel nacional.

CONCLUSIONES

Las bajas temperaturas, tanto a nivel de raíz como a nivel de panícula, limitan el rendimiento potencial de las variedades nacionales de arroz estudiadas, causando altos niveles de esterilidad floral, siendo la variedad Oro, la más estable en su comportamiento frente a las diferentes condiciones térmicas a las que se expuso.

El arroz, en todas las etapas de su ciclo de vida, es susceptible de sufrir daños por frío, pero cuando las distintas variedades son expuestas a éste en el momento en que se comienza a desarrollar la panícula hasta que se produce la emisión de ésta, el rendimiento es muy inferior al obtenido cuando las bajas temperaturas se presentan desde la emergencia hasta el inicio de macolla.

Si bien proteger a la panícula en formación, sumergiéndola en una lámina de agua que actúe como tampón ante las condiciones ambientales adversas, es una eficiente técnica para disminuir la esterilidad floral, esto no fue útil cuando la temperatura del agua es inferior a 20°C para las variedades Diamante-INIA y Ámbar-INIA.

Las variedades Oro y Harika son buenas alternativas para obtener buen rendimiento en aquellas zonas donde no se cuenta con temperaturas del agua superiores a 20°C durante la etapa reproductiva.

Las cuatro variedades de arroz estudiadas difieren en la susceptibilidad a bajas temperaturas, pero esto no se debe a los cambios en la viabilidad de los granos de polen, como se planteó en la hipótesis de este trabajo, pues no se logró determinar la existencia de alguna relación entre la viabilidad de los granos de polen y el porcentaje de vanazón. Esto significa que hay otras causas que podrían estar influyendo en la esterilidad floral presentada en cosecha que podrían estar relacionadas con la esterilidad femenina (ovulo) y receptividad del estigma.

Con este estudio se logró determinar un manejo efectivo del agua en el arrozal que permite reducir las pérdidas por vanazón de los granos causada por bajas temperaturas durante el ciclo de vida del cultivo para cada una de las 4 variedades analizadas. Así por ejemplo, en plantas de arroz de la var. Harika el productor debe concentrar sus esfuerzos en mantener la zona de raíces con una temperatura de agua cálida (superior a 20°C) durante el desarrollo de la panícula, o bien, si no se cuenta con una temperatura de agua adecuada, elevar la lámina de agua para que la diferencia de temperatura del aire entre el día y la noche no cause pérdidas en rendimiento. En cambio, para plantas de arroz var. Diamante-INIA solo es efectiva una lámina de agua cálida ya sea alta o baja cuando se desarrolla la panícula. En el caso de la variedad Ámbar-INIA, ésta debe ser manejada con una lámina de agua alta y cálida desde el momento en que se comienza a desarrollar la panícula, no siendo efectiva una lámina de agua cálida baja. Por otro lado, a diferencia de las 3 variedades ya nombradas, la var. Oro demostró ser la variedad más adaptada a baja temperatura,

obteniéndose con ella el mayor rendimiento y menor porcentaje de vanazón incluso cuando las plantas son sometidas a agua fría desde IP hasta 50% de floración.

LITERATURA CITADA

Alvarado, J.R. 1996. Situación del arroz en Chile. Uso Posible de Híbridos. *In*: Federación Nacional de Arroceros (FEDE ARROZ) (Ed.) Memorias II Reunión Grupo Técnico de Trabajo de Híbridos de Arroz para América Latina y El Caribe (GRUTHA). Ibagué, Colombia. 29 de octubre - 1 de noviembre.

Alvarado, R. 1999. Influence of air temperature on rice population, length of period from sowing to flowering and spikelet sterility. *In*: J.E. Hill and B. Hardy. Proceedings of the Second Temperate Rice Conference. Pp 63-68

Alvarado, J. R. 2002. Mejoramiento genético del arroz en Chile. Informativo agropecuario Bioleche - INIA Quilamapu. Disponible en: <http://www.inia.cl/quilamapu/publicaciones/articulos/bioleche/boletin2005/BOLETIN116.html>. Leído el 22 de Septiembre de 2008

Angus, J. F. and L. G. Lewin. 1991. Forecasting Australian rice yields, in Climatic Variation and Change: Implication for the Pacific Rim. University of California, Davis, CA. Pp 1 –8.

Aresti, M. E. 2008. Diseño y evaluación de un sistema de análisis de imagen para la determinación de granos de polen viables en el cultivo de arroz. Tesis Ingeniero Comercial. Universidad Técnica Federico Santa María, campus Santiago Vitacura. Santiago, Chile. 66p.

CIREN, CORFO. 1996. Estudio Agrologico Región Metropolitana. Descripción de Suelos, Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales, CORFO. Publicación 115, Tomos 1 y 2. 464p.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas, 2004. Año Internacional del Arroz 2004. Disponible en: <http://www.fao.org/rice2004/es/rice2.htm>. Leído el 13 de Marzo de 2009

Farrell T. C., K. M. Fox, R. L. Williams and S. Fukai. 2004. Australia: New screening method for cold tolerance during the reproductive stage in rice. 4th International Crop Science Congress. Disponible en: http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/7/1/695_farrellt.htm. Leído el 14 de Septiembre de 2008.

Fox, K. M., T.C. Farrell, and R.L. Williams. 2001. Rapid Image Analysis for counting engorged pollen grains of rice. Australia.

Fundación Chile. 2008. Instituto de investigaciones agropecuarias, empresas Carozzi e Innova Corfo. 2007/2008. RiceCheck Chile. Manual de recomendaciones. Documento elaborado en el marco del proyecto: Innova Chile – CORFO “Desarrollo de la Cadena Agroalimentaria del Arroz para la Exportación 2005 2007”

Guanawardena, T. A., S. Fukai and F. Blamey. 2003. Low temperature induced spikelet sterility in rice. I. Australian Journal of Experimental Agriculture. 54: 937-946.

Imin, N., T. Kerim, Weinman, J. Jeremy and G. Rolfe Barry. 2005. Low Temperature Treatment at the Young Microspore Stage Induces Protein Changes in Rice Anthers. Australian Research Council Centre of Excellence for Integrative Legume Research, Genomic Interactions Group, Research School of Biological Sciences, Australian National University, Canberra, Australia. Disponible en: <http://www.mcponline.org/cgi/content/full/5/2/274>. Leído el 15 de Septiembre de 2008.

International Rice Research Institute (IRRI).1995. Research program highlights. Manila, Philippines. International Report. p 21.

Kim, J., C. Jin, H. Jin, X. Gou, Y. Shin, J. Lee, J. Yea and S. Hong. 2008. Compared pollen sterility of different rice cultivars in low temperature condition. Abstracts, Journal of Biotechnology 136S. S217 – S231.

Kondo, Y. 1952. Physiological studies on cool-weather resistance of rice varieties. Bull, Natl. Inst. Agric Sci, D, 3:114-228.

Lentini, Z., C. Martínez, W. Roca. 1997..Cultivo de anteras de arroz en el desarrollo de germoplasma. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali -Colombia. pp.10-13

Matus, F., J. Rodríguez, D. Pinochet. 2001. Fertilización de los cultivos. LOM Ediciones. Santiago. 117 p.

Nishiyama, I.1995. In Science of the Rice Plant Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo. Pp 769 –793.

ODEPA, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2010. Superficie sembrada de cultivos anuales en Chile. Estadísticas agrícolas. Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl>. Leído el 10 de Noviembre del 2010.

Ortega, R. 2007. Concurso nacional de proyectos Fondecyt. Concurso regular 2007. Comisión Nacional de Investigación Científica y tecnológica. Fondo Nacional de desarrollo científico y tecnológico (FONDECYT). Chile. Pp12-14.

Santibáñez, F. y J. Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile. Regiones V y Metropolitana. Laboratorio de Agro climatología, Facultad de ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 65 p

Satake, T. 1970. Determination of the most sensitive stage to sterility cool injury in rice plants. Res. Bull. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Stn. 113. Pp 1-43.

Satake, T., and S. Yoshida, 1978. High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. Jpn. J. Crop Sci. 47. Pp 6-17.

Shibata, M. 1979. Progress in breeding cold-tolerant rice in Japan. *In* Report of a Rice Cold Tolerant Workshop, Suweon, Korea. 1978. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Filipinas. Pp 21-24.

Sthapit, B., K. Joshi, J. Wilson, and J. Witcombe. 1996. Inheritance of chlorophyll fluorescence in rice under chilling conditions. In Actes du seminaire riziculture d'altitude, Antananarivo, Madagascar. 19 mars-5 avril 1996. Colloques. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement-Cultures Annuelles, Montpellier, France. Pp 135-142

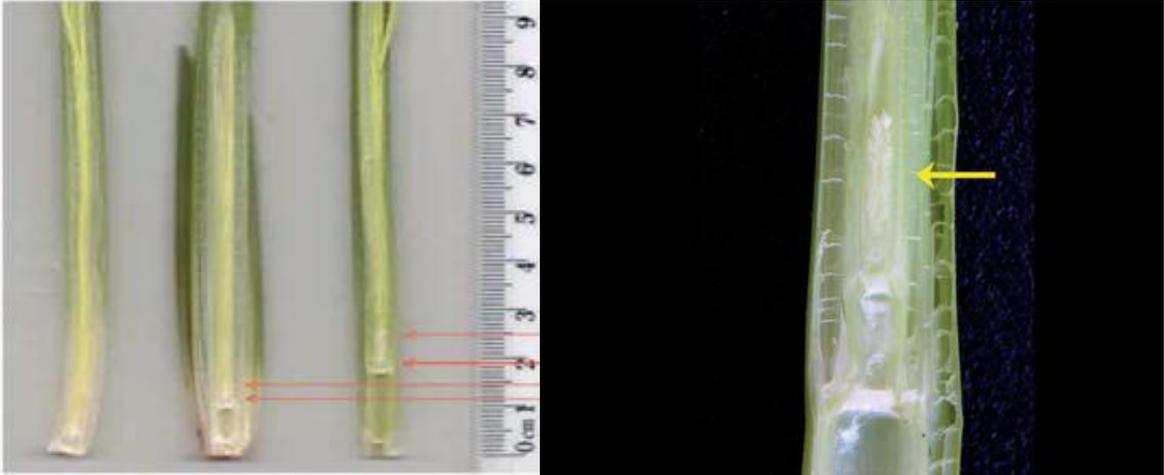
Tinarelli, A. 1989. El arroz. Versión española de R.M. Carreres O. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 575 p

Universidad De Filipinas, Escuela de Agricultura, 1975. Cultivo del Arroz, Manual de producción. 426 p.

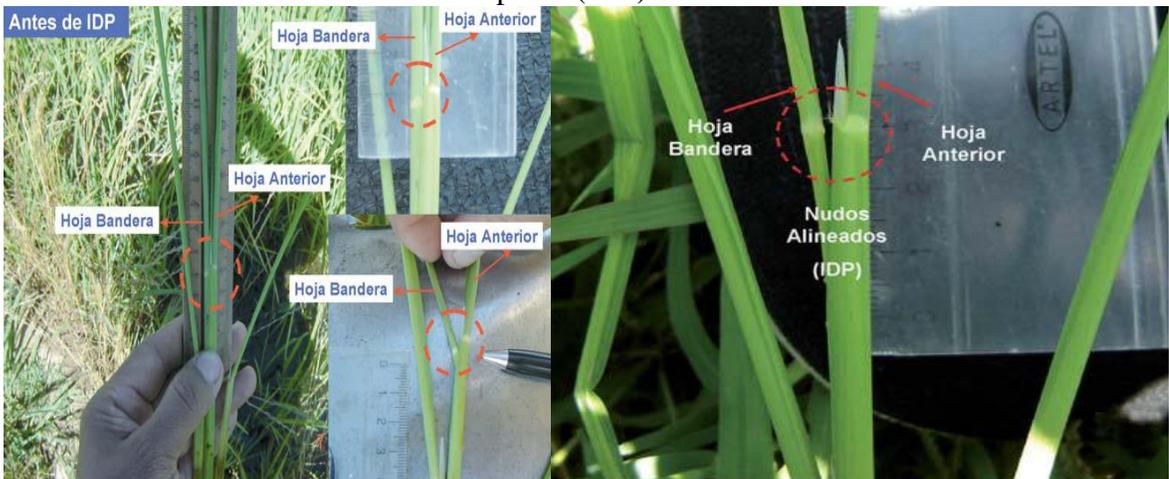
Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. Los baños: International Rice Research Institute. Cap. 1, pp 1-63: Growth and development of the rice plant.

Yoshida, R., A. Kanno and T. Kameya. 1996. Cool Temperature-Induced Chlorosis in Rice Plants. II. Effects of Cool Temperature on the Expression of Plastid-Encoded Genes during Shoot Growth in Darkness. *Plant Physiol.* (1996) 112: 585-590.

ANEXOS.

Anexo I. inicio de panícula (IP) en tallos disectados.

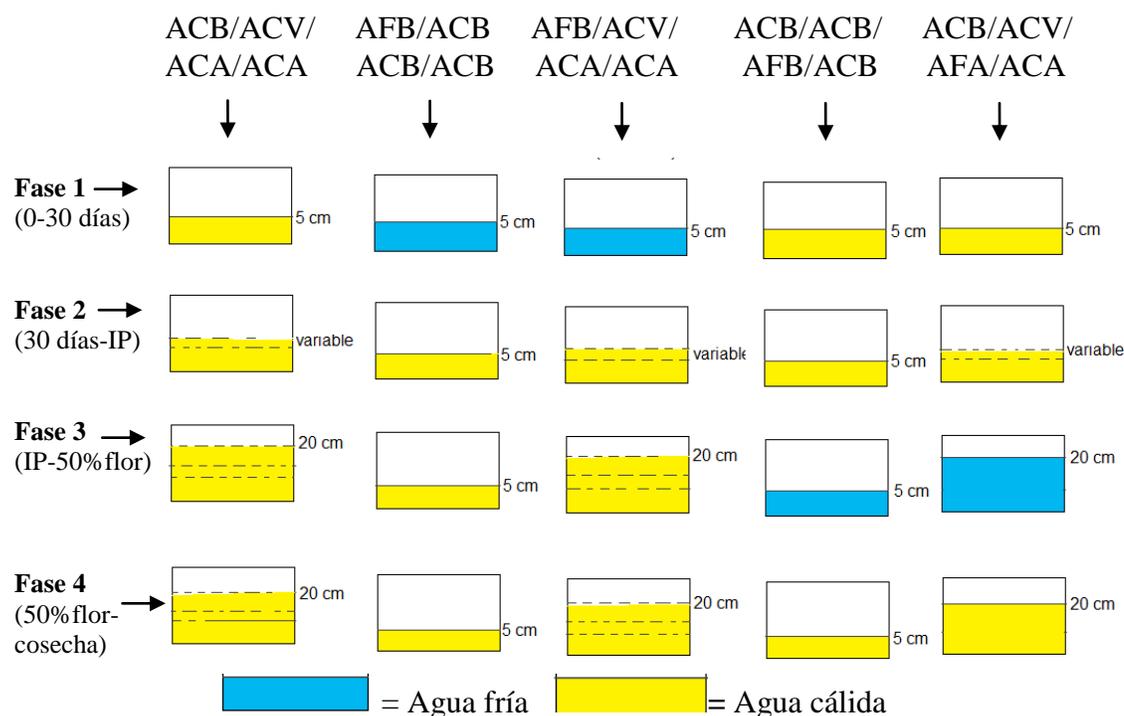
Fuente: Fundación Chile, 2008

Anexo II. Inicio de diferenciación del polen (IDP)

Fuente: Fundación Chile, 2008.

APÉNDICES.

Apéndice I. Esquema de las 5 diferentes condiciones térmicas aplicadas a una variedad



Apéndice II. Número de granos de polen viable (NPV), número de granos de polen totales (NPT) y porcentaje de inviabilidad de los granos de polen (PPI) obtenidos en cada tratamiento.

Tratamiento	Condición Térmica	Variedad	NPV	NPT	PPI(%)
1	ACB/ACV/ACA/ACA	Harika	59	220	72,5
2	ACB/ACV/ACA/ACA	Diamante-INIA	65	216	68,7
3	ACB/ACV/ACA/ACA	Oro	99	227	58,9
4	ACB/ACV/ACA/ACA	Ámbar-INIA	74	206	66,6
5	AFB/ACB/ACB/ACB	Harika	98	187	43,9
6	AFB/ACB/ACB/ACB	Diamante-INIA	45	211	74,9
7	AFB/ACB/ACB/ACB	Oro	71	194	63,4
8	AFB/ACB/ACB/ACB	Ámbar-INIA	80	276	66,4
9	AFB/ACV/ACA/ACA	Harika	121	229	45,2
10	AFB/ACV/ACA/ACA	Diamante-INIA	153	265	39,1

(Continúa)

Apéndice II. (Continuación)

Tratamiento	Condición Térmica	Variedad	NPV	NPT	PPI(%)
11	AFB/ACV/ACA/ACA	Oro	115	184	37,0
12	AFB/ACV/ACA/ACA	Ámbar-INIA	96	222	54,7
13	ACB/ACB/AFB/ACB	Harika	67	75	84,1
14	ACB/ACB/AFB/ACB	Diamante-INIA	29	133	77,5
15	ACB/ACB/AFB/ACB	Oro	76	195	63,2
16	ACB/ACB/AFB/ACB	Ámbar-INIA	61	138	59,4
17	ACB/ACV/AFA/ACA	Harika	67	185	65,8
18	ACB/ACV/AFA/ACA	Diamante-INIA	131	238	48,0
19	ACB/ACV/AFA/ACA	Oro	98	213	57,6
20	ACB/ACV/AFA/ACA	Ámbar-INIA	98	169	41,4

Apéndice III. Peso de granos vanos (PGV), peso de granos totales (PGT) y porcentaje de vanazón (PV) obtenidos en cada tratamiento.

Tratamientos	Condición Térmica	Variedad	PGV (g)	PGT(g)	PV (%)
1	ACB/ACV/ACA/ACA	Harika	1,04	29,77	5,1
2	ACB/ACV/ACA/ACA	Diamante-INIA	0,78	26,40	3,0
3	ACB/ACV/ACA/ACA	Oro	0,59	35,04	1,6
4	ACB/ACV/ACA/ACA	Ámbar-INIA	0,60	15,52	4,1
5	AFB/ACB/ACB/ACB	Harika	0,58	23,18	2,5
6	AFB/ACB/ACB/ACB	Diamante-INIA	0,46	15,33	3,0
7	AFB/ACB/ACB/ACB	Oro	0,70	24,76	2,8
8	AFB/ACB/ACB/ACB	Ámbar-INIA	1,20	12,64	11,0
9	AFB/ACV/ACA/ACA	Harika	0,70	26,46	2,6
10	AFB/ACV/ACA/ACA	Diamante-INIA	0,89	24,31	3,7
11	AFB/ACV/ACA/ACA	Oro	0,88	30,94	2,9
12	AFB/ACV/ACA/ACA	Ámbar-INIA	0,58	20,67	2,8
13	ACB/ACB/AFB/ACB	Harika	2,34	10,58	22,2
14	ACB/ACB/AFB/ACB	Diamante-INIA	1,63	16,38	10,0
15	ACB/ACB/AFB/ACB	Oro	0,77	23,98	3,2
16	ACB/ACB/AFB/ACB	Ámbar-INIA	1,92	9,88	24,6
17	ACB/ACV/AFA/ACA	Harika	0,68	25,13	2,8
18	ACB/ACV/AFA/ACA	Diamante-INIA	2,72	9,34	30,6
19	ACB/ACV/AFA/ACA	Oro	0,77	28,15	2,7
20	ACB/ACV/AFA/ACA	Ámbar-INIA	2,46	5,37	46,6