Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias

RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO DURANTE EL LLENADO DE GRANO EN EL SUR DE CHILE

Tesis de Magíster

JORGE QUIROZ MERCADO

VALDIVIA - CHILE

2010

RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO DURANTE EL LLENADO DE GRANO EN EL SUR DE CHILE

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al grado de Magíster en Ciencias Vegetales, Mención Producción Vegetal.

Por

JORGE QUIROZ MERCADO

Valdivia - Chile

2010

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

INFORME DE APROBACIÓN TESIS DE MAGÍSTER

La Comisión Evaluadora de Tesis comunica al Director de la Escuela de Graduados de la Facultad de Ciencias Agrarias que la tesis de Magíster presentada por el candidato:

JORGE QUIROZ MERCADO

ha sido aprobada en el examen de defensa de Tesis rendido el día 25 de junio de 2010, como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Vegetales, Mención Producción Vegetal y, para que así conste para todos los efectos firman:

Profesor patrocinante de Tesis:

Prof. Daniel Calderini R. _____
Ing. Agr. M. Sc., Dr.

Comisión Evaluadora de Tesis:

Prof. Ricardo Fuentes P. _____
Ing. Agr. M. Sc.

Prof. Juan Nissen M. _____
Ing. Agr. Dr. Rer. Hort.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y abuelas por lo bueno que han sido siempre conmigo y por ser gente noble e inteligente.

A Mariana (María Antonieta Rosales Soto la Marina) por ser una persona extraordinaria que marcó un antes y un después en mi forma de pensar, vigente hasta el día de hoy.

" En de retrospectiva No. 2 "

A todos los profesores que han contribuido en la adquisición de conocimientos en mi cerebro.

Al selecto grupo de personas considerados mis amigos.

A todos aquellos momentos gratos del pasado.

A la gente que tenga interés de leer este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al gobierno de Michelle Bachelet por otorgarme la beca para estudios de magíster en Chile, por medio de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT).

A Daniel Calderini R. y Patricio Sandaña G. hago un especial agradecimiento por todo su apoyo, atención y entendimiento durante la realización de esta tesis.

Al "team" que siempre estuvo a mi lado durante esta aventura de la "Crop Physiology", con sinceridad muchas gracias: Javier Marín, Daniela Bustos, Ariel Ramos, Jaime Herrera, Claudia Harcha, Marcelo Labra, Susana Valle, Carolina Lizana, Carlos Amador, Ahmed Hasan, Patricio Sandaña y Daniel Calderini.

Al los Profesores Carlos G. Martínez Rueda de la UAEMéx. y Daniel J. Miralles de la UBA por la chispa de apoyo en el momento preciso que hizo posible iniciar este Magíster.

A las personas que en su momento me ayudaron en el laboratorio de Fisiología de Cultivos y a las que laboran en la Facultad de Ciencias Agrícolas, la Escuela de Graduados y la estación experimental Santa Rosa de la Universidad Austral de Chile por brindarme las facilidades para la realización de esta tesis.

A aquellos estudiantes de postgrado de distintos países (México, Ecuador, Bangladesh, Guatemala, Argentina, Haití, Francia, Canadá, Venezuela, Colombia, Panamá, España, Perú, Chile) que hicieron más grata mi estancia en Valdivia y por su amistad.

A los miembros del comité de revisores de la presente tesis por sus valiosas aportaciones y sugerencias.

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
	RESUMEN	VIII
	ABSTRACT	X
	ABREVIATURAS	XII
1.	**INTRODUCCIÓN GENERAL**	**1**
1.1.	Producción actual de cereales y escenarios futuros a nivel mundial	1
1.2.	Situación de los cereales inverno-primaverales en el sur de Chile	2
1.3.	Situación climática actual y perspectivas futuras para el sur de Chile	3
1.4.	Generación del rendimiento en los cereales	5
1.5.	Respuestas de trigo, cebada y triticale al déficit hídrico	7
1.5.1.	Producción de biomasa en trigo, cebada y triticale	9
1.5.2.	Producción de biomasa post-antesis y sus determinantes fisiológicos en trigo, cebada y triticale	10
1.6.	Objetivo general	13
1.7.	Objetivos específicos	13
1.8.	Hipótesis	13
1.9.	Bibliografía	15
2.	**RESPUESTA DEL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES NUMÉRICOS EN TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO EN POST-ANTESIS EN EL SUR DE CHILE**	**21**
2.1.	Introducción	21
2.2.	Materiales y Métodos	24
2.2.1.	Ubicación del experimento	24
2.2.2.	Tratamientos	24
2.2.3.	Manejo del trabajo experimental	25
2.2.4.	Mediciones	26

2.2.5.	Análisis estadístico	26
2.3.	Resultados	28
2.3.1.	Condiciones Climáticas	28
2.3.2.	Humedad del suelo	29
2.3.3.	Fenología de los cultivos	30
2.3.4.	Rendimiento de grano y atributos de los cultivos	31
2.3.5.	Componentes numéricos del rendimiento	33
2.3.6.	Partición de biomasa a cosecha	36
2.4.	Discusión	38
2.5.	Bibliografía	42
3.	**BIOMASA, INTERCEPCION DE RADIACIÓN Y EFICIENCIA DEL USO DE LA RADIACIÓN EN TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO EN POST-ANTESIS EN EL SUR DE CHILE**	**46**
3.1.	Introducción	46
3.2.	Materiales y métodos	50
3.2.1.	Mediciones	50
3.2.2.	Análisis estadístico	52
3.3.	Resultados	53
3.3.1.	Producción de biomasa aérea y tasa de crecimiento de los cultivos	53
3.3.2.	Índice de área foliar e intercepción de radiación	55
3.3.3.	Eficiencia en el uso de la radiación	59
3.4.	Discusión	61
3.5.	Bibliografía	65
4.	**DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES**	**69**
4.1.	Discusión	69
4.2.	Conclusiones	71

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Precipitaciones anuales (a) y mensuales durante diciembre (b) y enero (c) en Valdivia entre los años de 1960-2008. Elaborado con datos proporcionados por el Instituto de Geociencias de la UACh	4
2.	Relación entre el rendimiento de grano de trigo y el uso de agua de experimentos conducidos por French y Schultz (1984). Los puntos representan los rendimientos promedios en experimentos conducidos sobre varias estaciones y localidades. La línea representa alta eficiencia de transpiración observada y la intercepción en la abscisa representa la evaporación del suelo. Las líneas verticales entre los puntos representan diferentes manejos de tratamientos en el cultivo en un experimento	9
3.	Precipitación, evapotranspiración del cultivo (ETc), temperatura, radiación global y aplicación de riego post-antesis durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. 1N, primer nudo; Bo, bota; At, antesis; MC, madurez de cosecha	28
4.	Disponibilidad hídrica del suelo a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm en antesis (a, b y c) y madurez de cosecha (d, e y f) en trigo, cebada y triticale en los tratamientos de riego (barras grises) y secano (barras blancas) post-antesis. CC, capacidad de campo (45%V) y PMP, punto de marchitez permanente (26%V). Valores de CC y PMP son estimados de información proporcionada por Dörner, Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos	30
5.	Fases fenológicas después de emergencia en tres cultivos evaluados en Valdivia en la temporada 2008/09. Las barras muestran la duración de cada fase fenológica: emergencia-primer nudo (1N, barras negras), primer nudo-bota (Bo, barras punteadas), bota-antesis (At, barras blancas) y antesis-madurez fisiológica (MF, barras rayadas)	31
6.	Relación entre el rendimiento de grano y (a) la biomasa aérea y (b) la altura de planta en trigo (círculos) cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis	33

7. Relación entre el rendimiento de grano y (a) el número de granos m^{-2} y (b) el peso de 1000 granos en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis 35

8. Relación entre el peso de grano y (a) la duración de llenado de grano y (b) la tasa de llenado de grano en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis 36

9. Seguimiento de los muestreos de biomasa según el estado fenológico de la planta de trigo. 1N, primer nudo; Bo, bota; At, antesis; MC, madurez de cosecha. Adaptado de Slafer y Rawson. (1994) 51

10. Evolución de la biomasa aérea promedio en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) durante todo el ciclo de cultivo durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo 54

11. Evolución del índice de aérea foliar en (a) trigo, (b) cebada y (c) triticale bajo tratamientos de riego (círculos cerrados) y secano (círculos abiertos) post-antesis durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo 57

12. Evolución del porcentaje de intercepción de radiación incidente promedio en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo 58

13. Promedios estandarizados del rendimiento de grano, número de granos (NG), peso de 1000 granos (P1000G), producción de biomasa aérea, intercepción de radiación acumulada (IRa) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) total y durante pre y post-antesis en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados). Promedios con la misma letra dentro de cada círculo, triángulo y cuadrado en una misma variable no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05) 64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Superficie sembrada y producciones promedios de trigo, cebada y avena cultivados en la zona sur de Chile	3
2.	Rendimiento de grano, producción de biomasa aérea, altura de planta e índice de cosecha de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	32
3.	Número de granos por m^{-2}, peso de 1000 granos, número de espigas por m^{-2} y número de granos por espiga de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	34
4.	Peso de espigas, tallos y hojas y la relación número de grano por peso de espiga (NG/PE) de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	37
5.	Biomasa aérea total, acumulada en pre y post-antesis y tasa de crecimiento de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	53
6.	Índice de área foliar (IAF) en antesis, intercepción de radiación acumulada total y en pre y post-antesis de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	56
7.	Eficiencia en el uso de la radiación total y en pre y post-antesis de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09	60

RESUMEN

Analizar los efectos del cambio climático sobre las necesidades de riego en la producción de cereales invierno-primaverales es de gran relevancia para conocer los alcances y limitaciones de los rendimientos de grano en la zona sur de Chile. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta al déficit hídrico moderado durante el llenado de los granos en cultivos de trigo (cv. Pandora), cebada (cv. Acuario), y triticale (cv. Aguacero), en las condiciones agroclimáticas del sur de Chile. Se realizó un experimento en el campo experimental Santa Rosa de la Universidad Austral de Chile en Valdivia. Se evaluaron tres cereales de clima templado (trigo, cebada y triticale) y dos regímenes hídricos (riego y secano post-antesis), durante la temporada 2008-2009. Se cuantificó el rendimiento de grano y sus componentes númericos, así como los determinantes fisiológicos de la producción de biomasa (IR, intercepción de radiación; EUR, eficiencia en el uso de radiación). Los cultivos mostraron diferencias significativas ($p<0,05$) en el rendimiento de grano, peso de granos m^{-2}, producción de biomasa aérea y la intercepción de radiación total, excepto para número de granos m^{-2} y la EUR. Los rendimientos promedios de trigo, cebada y triticale fueron de 10.5, 10.9 y 12.8 t ha^{-1}, respectivamente. El rendimiento estuvo relacionado positivamente ($p<0,001$) con el número de granos m^{-2}. Además, la alta producción de biomasa fue asociada con alto rendimiento de grano en triticale en comparación a trigo y cebada. Por otra parte, los regímenes hídricos no mostraron diferencias ($p>0,05$) para el rendimiento de grano, peso de granos m^{-2}, número de granos m^{-2}, ni en la producción de biomasa, IR y EUR. Se concluye que el déficit hídrico moderado no modifica el rendimiento y sus componentes numéricos, ni los determinantes fisiológicos de la producción biomasa (IR, EUR), al menos en suelos Andisoles.

Los resultados de esta tesis permiten tener una estimación de situaciones que no comprometan el rendimiento de los cereales inverno-primaverales y al mismo tiempo, estimar otras situaciones de mayor sensibilidad frente a los efectos futuros del cambio climático en la zona sur de Chile.

Palabras clave: trigo, cebada, triticale, riego y secano post-antesis, rendimiento de grano, biomasa, intercepción de radiación y eficiencia del uso de la radiación.

ABSTRACT

Analysis the effects of climatic change on irrigation requirements in the production of winter-spring cereal are highly relevant to know the scope and limitations of yields in the southern Chile. The aim of this study was to evaluate the response of moderate water deficit during grain filling period in wheat (cv. Pandora), barley (cv. Acuario), and triticale (cv. Aguacero) in the southern agro-climatic conditions of Chile. An experiment was conducted in Santa Rosa, Valdivia, experimental station of the Universidad Austral de Chile. Three temperate cereals (wheat, barley and triticale) and two water regimes (post-anthesis rainfed and irrigated) were evaluated during the 2008-2009 growing season. Grain yield and its main components were quantified and physiological determinants of biomass production (IR, interception of radiation and RUE, radiation use efficiency) were measured. The cultivars showed significant differences ($p<0,05$) for grain yield, grain weight $m^{-2,}$ biomass production and radiation interception total, except for number of grains m^{-2} and the radiation use efficiency. Average grain yield of wheat, barley and triticale were 10.5, 10.9 y 12.8 t ha^{-1}, respectively which is positively related with number of grains m^{-2}. Besides, higher biomass production was associated with higher grain yield in triticale in comparison with wheat and barley. Water regimes showed no significant differences for yield, grain weight m^{-2}, grain number m^{-2}, or in the production of biomass, IR and in the RUE. It can be concluded that moderate water deficit did not change the main components of grain yield or physiological determinants of biomass production (IR, EUR), at least in volcanic ash soils. The results of this thesis give an estimation of situations that do not compromise the grain yield of winter-spring cereal and at the same time, to estimate other

situations of greater sensitivity to the future effects of climate change in southern Chile.

Key words: wheat, barley, triticale, irrigated and rainfed post-anthesis, grain yield, above-ground biomass, interception of radiation and radiation use efficiency.

ABREVIATURAS

At: antesis

Bo: bota

C: cosecha

cm: centímetro

ETc: evapotranspiración del cultivo

EUR: eficiencia en el uso de radiación

g: gramo

ha: hectárea

IAF: índice de área foliar

IC: índice de cosecha

IR: intercepción de radiación

IRa: intercepción de radiación acumulada

m: metro

NG: número de granos

NG/PE: relación número de granos por unidad de biomasa de espiga

PG: peso de los granos

P1000G: peso de mil granos

t: tonelada

1N: primer nudo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Producción actual de cereales y escenarios futuros a nivel mundial

Los cereales representan en la actualidad una parte fundamental de la dieta humana en la mayoría de los países del mundo. Si bien el rendimiento de cultivos como trigo, arroz, maíz y cebada fue duplicado durante el siglo XX mediante la mejora genética y el manejo de los cultivos (Slafer y Andrade, 1991; Bell y Fischer, 1994; Peng y col., 1999; Tollenaar y Wu, 1999; Abeledo y col., 2002), los actuales niveles de producción parecen insuficientes para cubrir la demanda estimada para el futuro mediato (Evans, 1998; Dyson, 1999); por ello, los rendimientos medios mundiales de trigo (2,8 t ha^{-1}), cebada (2,7 t ha^{-1}), maíz (4,1 t ha^{-1}) y arroz (3,1 t ha^{-1}), deberían aumentar a 4,4; 4,1; 5,8 y 5,3 t ha^{-1}, respectivamente, hacia el año 2025 para cubrir la demanda esperada (Bynes y Bumb, 1998). En este sentido, analizar los efectos del cambio climático en la producción de cultivos es de gran relevancia para conocer los alcances y limitaciones del rendimiento y producciones actuales y futuras.

Cambios en temperatura y precipitación son esperados en un amplio rango de ambientes. Se prevé que la temperatura media global pueda incrementarse de 1,1 a 6,4°C entre 2008-2100 (IPCC, 2007). Esto se traducirá en incrementos significativos de temperatura en verano con variaciones mucho más frecuentes y altos índices de calor, provocando una reducción de la humedad del suelo por aumento en la demanda de evaporación en los ambientes. Los aumentos de temperatura y evaporación conducirán a días más calurosos y limitaciones hídricas más severas para los cultivos, aunque las precipitaciones totales seguirán siendo en gran medida similares (Rosenzweig y Hillel 1998;

IPCC, 2001a; Risbey y col., 2003). A pesar de esto, las precipitaciones de primavera podrían incrementarse más que en verano (Salinger y col., 2000; IPCC, 2001a), mientras que la evapotranspiración podría incrementarse más en verano disminuyendo la humedad del suelo y afectando la producción de los cultivos.

1.2. Situación de los cereales inverno-primaverales en el sur de Chile

El sur de Chile se caracteriza particularmente por ser una zona de alto potencial para la producción de cereales invierno-primaverales como son trigo, cebada, triticale y avena; en donde algunos de estos cultivos anuales ocupan una proporción importante de la superficie agrícola en la zona (Cuadro 1). En el caso particular de trigo, solo en la temporada 2008/09 alcanzó en promedio una superficie sembrada de 222.400 ha, mientras que cebada alcanzó 18.300 ha en la misma temporada agrícola. Ambos cultivos representaron el 63 y 5% respectivamente de los cereales sembrados en la zona sur de Chile, en donde las producciones promedio fueron de 1.014.213 t para trigo y 88.904 t para cebada en la misma temporada 2008/09 (ODEPA, 2008).

Cuadro 1. Superficie sembrada y producciones promedios de trigo, cebada y avena cultivados en la zona sur de Chile.

Año	Trigo	Cebada	Avena
	Superficie sembrada (ha)		
2003/04	303600	10700	117200
2004/05	308960	20470	72370
2005/06	235750	27580	86580
2006/07	212200	19400	99600
2007/08	222400	18300	94200
	Producción (t ha^{-1})		
2003/04	1419214	52267	525305
2004/05	1373163	97727	346629
2005/06	1099059	130520	428395
2006/07	1022513	95973	515242
2007/08	1014213	88904	371455

La zona sur incluye las regiones de la Araucanía, Bío Bío y Los Lagos. La región de los Ríos se anexa solo en la temporada 2007/08. Elaborado con datos proporcionados por la ODEPA (2008).

1.3. Situación climática actual y perspectivas futuras para el sur de Chile

En el sur de Chile el registro histórico anual de las precipitaciones entre 1960 y 2008 muestra un comportamiento relativamente estable de las mismas hasta 1990. Con posterioridad a ese año se observan fluctuaciones mucho más pronunciadas y extremas, es decir, años más y menos lluviosos que en períodos anteriores como se muestra en la Fig. 1a. Considerando los meses de diciembre y enero, meses en los cuales generalmente se realiza la cosecha de los cereales de invierno en la zona, se registra una tendencia de las precipitaciones a disminuir hacia el final de la estación de crecimiento de los cultivos, lo que implica una menor disponibilidad de agua para los cultivos con posibles riesgos de sequía terminal durante la etapa de llenado de grano (Fig. 1b, c). Esto conduciría, en un escenario de cambio climático, a una posible disminución de los rendimientos reales en la zona.

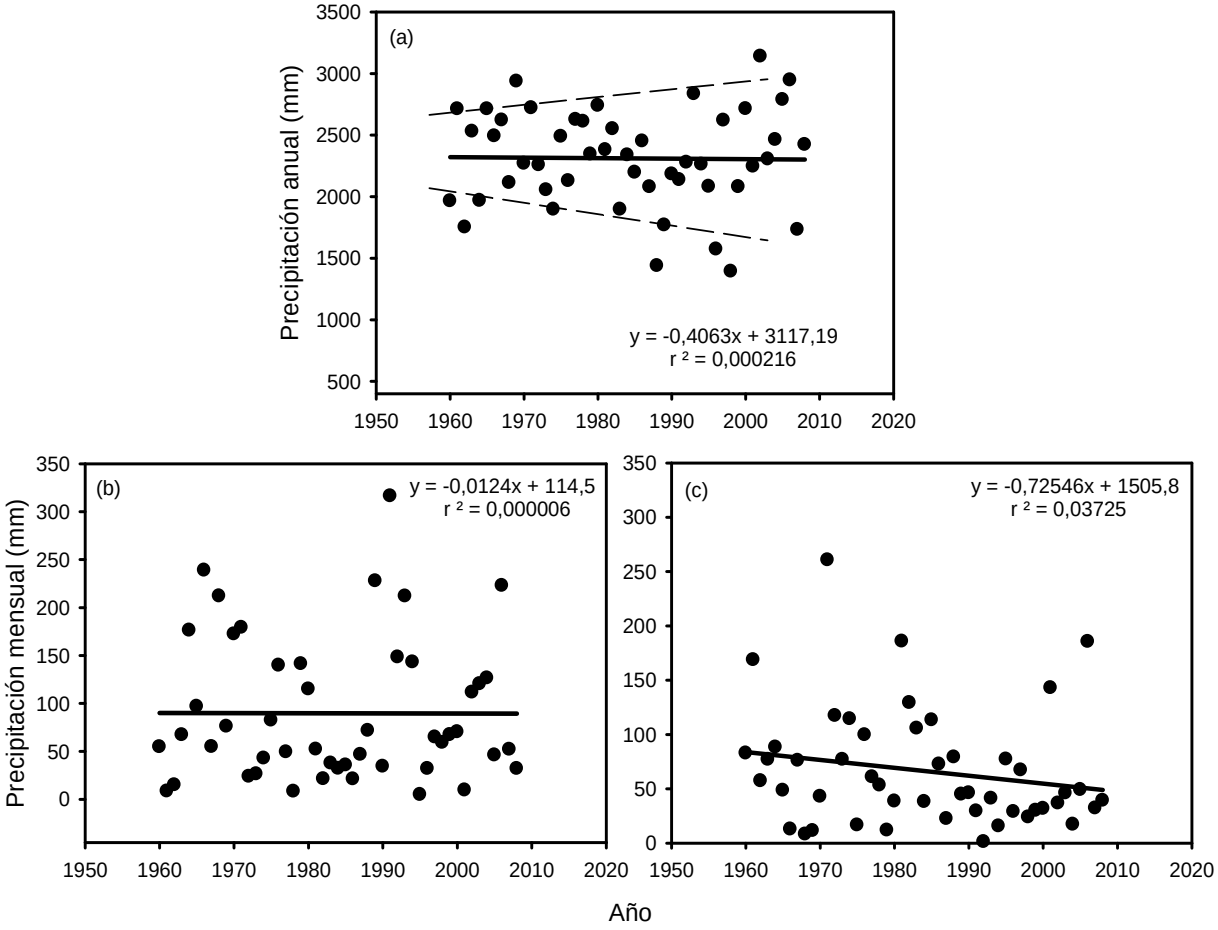

Fig. 1. Precipitaciones anuales (a) y mensuales durante diciembre (b) y enero (c) en Valdivia entre los años de 1960-2008. Elaborado con datos proporcionados por el Instituto de Geociencias de la UACh.

Las proyecciones de necesidades de riego para la producción de cultivos, frente a escenarios de cambio climático, muestran aumentos o disminuciones dependiendo de la zona del país. Se prevé que en la Región de la Araucanía los incrementos en las necesidades de riego se harán más notables debido a un aumento en la evapotranspiración, que a la vez será consecuencia de alzas en los niveles de temperatura. Por efecto del incremento en las temperaturas, se acortarán los ciclos de vida de los cultivos durante las estaciones de primavera y verano pudiendo palearse esto mediante la modificación de la

fecha de siembra, como siembras más tempranas (AGRIMED, 2008). Sin embargo, esto será así en la medida que la fecha media de las últimas heladas se modifique en la misma magnitud en que se incrementen las temperaturas porque de mantenerse el riesgo de heladas en fechas similares será necesario mantener la fecha de siembra actual para este tipo de cultivos por riesgo de daño por heladas en floración o posteriores. Teniendo esto en cuenta, es posible que sin mayores riesgos de heladas el impacto del estrés hídrico sea leve como consecuencia del acortamiento del ciclo vegetativo por mayores temperaturas pero por otra parte, un acortamiento en el ciclo de los cultivos disminuiría el potencial de rendimiento. Por lo tanto, para mantener los niveles de producción se deberán utilizar cultivares de mayor duración de ciclo lo que implicará el riesgo de limitación hídrica hacia el llenado de granos. Por ello, la evaluación del efecto de una disminución de la oferta hídrica post-floración es de gran importancia, junto con otras evaluaciones, para establecer los escenarios productivos futuros en las regiones del sur de Chile, especialmente abordando el momento de ocurrencia del posible déficit hídrico en relación con la determinación del rendimiento del cultivo.

1.4. Generación del rendimiento en los cereales

Es ampliamente conocido que el rendimiento de los cultivos de grano está determinado por dos componentes principales, el número de granos por m^2 y el peso promedio de los mismos (Slafer y Rawson, 1994). De ellos, el número de granos ha sido fuertemente asociado con los progresos genéticos para incrementar el rendimiento potencial (Slafer y col., 1994). El peso de granos generalmente no explica las mejoras en el rendimiento, aún cuando hay algunas excepciones en trigo (Calderini y col., 1995a, 1999b). Para la determinación del

primero de los componentes mencionados, se considera como período crítico para su determinación entre 20 días pre-antesis y 10 días post-antesis (Fischer, 1985; Savin y Slafer, 1991; Abbate y col., 1995), mientras que el potencial de peso de grano se define inmediatamente previo a la antesis y en las primeras etapas de post-antesis (Wardlaw, 1994; Calderini y col., 1999b; Ugarte y col., 2007). Lo anterior muestra las ventanas de tiempo más importantes para la determinación del rendimiento de grano en cereales, de especial importancia para evaluar las sensibilidad de los componentes del rendimiento frente a factores como déficit hídrico y alta temperatura.

Los cereales de invierno muestran generalmente relaciones negativas entre los componentes del rendimiento, especialmente entre los subcomponentes del número de granos por unidad de superficie. En relación al número de granos y peso de grano, menor número de granos por superficie incrementa el peso promedio de los granos, pero generalmente esto no es suficiente para suplir las pérdidas debidas a la mortalidad en el número de granos (Slafer y col., 1996). Por ello, estreses ambientales que afecten el período crítico para la determinación del número de granos no podrán ser compensados aún cuando las condiciones ambientales mejoren en etapas posteriores a dicho período. En un escenario de cambio climático, con aumentos térmicos y déficit hídricos hacia el final del ciclo de cultivo, el riesgo de menor número de granos y menor peso de los mismos afectará la potencialidad de rendimiento del cultivo. En este sentido, un déficit hídrico terminal, afectaría principalmente el peso potencial y real de los granos.

1.5. Respuestas de trigo, cebada y triticale al déficit hídrico

Diferencias genotípicas en el peso promedio de grano en cebada y trigo tienen relación con variaciones en el número de células del endosperma establecidas durante el inicio de desarrollo de grano y el número de gránulos de almidón formados (Brocklehurst, 1977; Cochrane y Duffus, 1983). Sin embargo, eventos iniciales de desarrollo pueden ser también importantes en la contribución al tamaño potencial de grano a través de efectos en peso de carpelos en antesis (Scott y col., 1983; Calderini y col., 1999b). A pesar de que el peso de grano esta determinado genéticamente, también es afectado por las condiciones climáticas como son la disponibilidad hídrica o el régimen de temperaturas (Calderini y col., 1999b; Voltas y col., 1998).

En trabajos con trigo, a menudo se ha observado que el rendimiento es limitado por efecto del déficit hídrico durante el llenado de los granos (Kobata y col., 1992). En ambientes mediterráneos, estudios comparativos entre trigo y cebada bajo riego y secano desde elongación de tallo hasta cosecha mostraron que el rendimiento de grano fue afectado principalmente por un menor número de granos por unidad de área en ambos cultivos (Cossani y col., 2009). Sin embargo, los estudios que compararon rendimientos de trigo y cebada bajo condiciones mediterráneas no lograron conclusiones uniformes ya que en algunos casos los resultados han apoyado la hipótesis de que la cebada tiene ventaja sobre trigo (por ejemplo, Josephides, 1993 en Chipre; López-Castañeda y Richards, 1994 en New South Wales, Australia), mientras que en otros se ha observado que trigo mostró mejor comportamiento que cebada (por ejemplo, Simpson y Siddique, 1994, en Australia Occidental; Palumbo y Boggini, 1994 en Italia; Cossani y col., 2009 en España).

Por otra parte, el cultivo de triticale es mencionado como un cereal adaptado a ambientes marginales (Lukaszewski y Gustafson, 1987). En la literatura se ha destacado al triticale comparativamente con trigo y cebada por tener un ciclo de crecimiento más largo, mayor potencial de rendimiento, mayor tolerancia a sequía, bajas temperaturas, baja fertilidad y mayor resistencia al ataque de plagas y enfermedades (Royo, 1992). Algunos trabajos en triticale con tratamientos de riego y secano han encontrado rendimientos similares, sustentando el supuesto generalmente asumido que triticale tiene una buena adaptación a condiciones de déficit hídrico. Esto ha sido apoyado también por los estudios de Giunta col. (1993), quienes atribuyen la buena adaptación de triticale a la gran capacidad de las raíces para extraer agua de los suelos. Otros trabajos mencionan que triticale puede lograr grandes beneficios en primaveras lluviosas como en períodos de sequía debido a su larga duración de llenado de grano (Laroche y Gate, 1996).

A pesar de los diversos trabajos realizados para evaluar las sensibilidades de trigo, cebada y triticale frente a estreses hídricos, la mayoría de ellos han explorado dos cultivos bajo un mismo ambiente sin que se pueda concluir de manera precisa los alcances y limitaciones del rendimiento en estos. La evaluación de trigo, cebada y triticale en un mismo experimento sería pertinente para sumar información que permita entender las causas que limitan el rendimiento de grano, así como elegir cultivos que no comprometan el rendimiento frente a limitaciones hídricas especialmente en etapas de llenado de grano en el sur de Chile.

1.5.1. Producción de biomasa en trigo, cebada y triticale

La producción de biomasa está intrínsecamente vinculada a la disponibilidad hídrica, la cual regula la apertura estomática y el área foliar que determinan la tasa de fotosíntesis y la transpiración del cultivo. En este sentido, existe una relación estrecha entre la disponibilidad hídrica y el rendimiento de los cereales. En el caso de trigo French y Schultz (1984a, b), propusieron un modelo para el sur de Australia basado en la eficiencia del cultivo para adquirir y utilizar el agua disponible de los suelos y el nivel de rendimiento obtenido (Fig. 2). El trabajo muestra un aumento en el uso de agua en los cultivos con el creciente aumento de la disponibilidad hídrica en la temporada, lo que resulta en una tendencia positiva, aunque variable, entre el rendimiento de grano y el uso de agua. Este modelo general resulta de utilidad para establecer los límites que puede imponer el agua en la productividad de trigo.

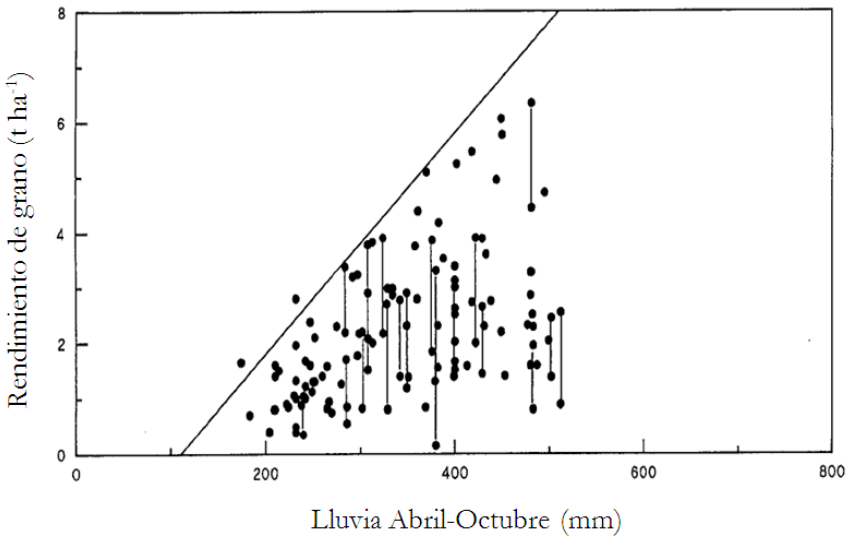

Fig. 2. Relación entre el rendimiento de trigo y el uso de agua de experimentos conducidos por French y Schultz (1984a, b). Los puntos representan los rendimientos promedios en experimentos conducidos sobre varias estaciones y localidades. La línea representa alta eficiencia de transpiración observada y la intercepción en la abscisa representa la evaporación del suelo. Las líneas verticales entre los puntos representan diferentes manejos de tratamientos en el cultivo en un experimento.

Por otro lado, en estudios con cebada bajo sequía impuesta desde dos semanas antes o después de la antesis, mostraron una reducción en la producción biomasa (Jamieson y col., 1995). Otros estudios donde evaluaron cebada, trigo pan y trigo duro bajo riego y secano en distintos niveles de nitrógeno reportaron incrementos en la producción de biomasa total en tratamientos con riego (Cossani y col., 2009). Lo anterior muestra la variabilidad de respuesta de los cultivos en la producción de biomasa frente a limitaciones hídricas.

1.5.2. Producción de biomasa post-antesis y sus determinantes fisiológicos en trigo, cebada y triticale

Un efecto importante de la limitación hídrica, como se vió en la Fig. 2, es el menor rendimiento que logra el cultivo de trigo. Los efectos de limitación hídrica sobre el rendimiento de grano pueden ser explicados por sus determinantes fisiológicos. En este sentido, el rendimiento puede ser definido en función de la intercepción de radiación (IR), la eficiencia en el uso de radiación (EUR) y el índice de cosecha (IC) (Sinclair y Machow, 1999). La IR por el cultivo puede ser descrita en términos de la cantidad de radiación solar incidente y la fracción interceptada por la canopia. Mientras que, la EUR se describe como la pendiente entre la intercepción de radiación acumulada (IRa) y la producción de biomasa durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

La cantidad de IRa por un cultivo depende de la duración del ciclo y la dinámica de la intercepción de dicho cultivo. Esta última está fuertemente ligada al índice de área foliar (IAF), que a su vez puede ser modificado por la disponibilidad de agua afectando la generación y el mantenimiento del área foliar, cambiando la pendiente de la EUR. En estudios en trigo bajo condiciones no

limitantes han reportado valores de EUR en el rango de 1.46 a 2.93 g MJ^{-1} (Gregory y col., 1992; Yunusa y col., 1993), mientras que en condiciones de déficit hídrico en Australia se han reportado valores de EUR de 0.91 g MJ^{-1} en este mismo cultivo (O`Connell y col., 2004). En cebada se han reportado valores en el rango de 1.79 a 2.33 g MJ^{-1} sobre ambientes mediterráneos, dependiendo de la localidad y las variedades del cultivo (Gregory y col., 1992; Jamieson y col., 1995). Czerednik y Nalborczyk (2001) reportaron una aproximación en triticale, atribuyendo que las diferencias en rendimiento biológico y económico entre dos cultivares fue por incrementos en la IR y EUR. En estudios con triticale, donde evaluaron varias densidades en condiciones de riego y secano, no encontraron diferencias en el rendimiento justificando una buena adaptación del cultivo en las distintas densidades evaluadas, de las cuales se observó una EUR de 1.37 g MJ m^{-2} a una densidad de siembra de 300 plantas m^{-2} (Giunta y Motzo, 2004). En general, las comparaciones de valores de EUR entre cultivos o variedades pueden diferir y ser sobreestimadas porque el cálculo no incluye el peso de raíces. Sin embargo, Gregory col. 1992 mostraron pequeñas discrepancias entre resultados de experimentos con inclusiones de peso de raíz en trigos.

Abordando el efecto de limitación hídrica sobre el período post-antesis en cereales, los determinantes fisiológicos de la producción de biomasa (IR y EUR) pueden variar afectando de manera importante la relación fuente-destino en el momento de llenado de grano. Lo anterior permite tener en cuenta que en condiciones de alto potencial de rendimiento como es la zona sur de Chile, modificaciones en la IR y la EUR por limitación hídrica podrían tener efectos evidentes en el crecimiento de los granos. Si bien, el suministro de

asimilados durante el llenado de grano proviene tanto de la fotosíntesis actual (Slafer y Rawson, 1994; Slafer y Savin, 1994; Schnyder, 1993) como de la translocación de reservas acumuladas en pre-antesis, importante bajo condiciones de estrés hídrico (Acevedo y col., 1991; Fokar y col., 1998; Ehdaie y col., 2006b), el déficit hídrico moderado podría generar un efecto negativo evidente en la captura de asimilados afectando negativamente el rendimiento y los determinantes fisiológicos de la producción de biomasa.

Lo anterior permite considerar que la sensibilidad de los cereales a limitaciones hídricas durante la etapa de llenado de grano puede ser variada. Sin embargo, hay pocos estudios donde se comparen cultivos de trigo, cebada y triticale en las mismas condiciones experimentales. Las especulaciones sobre la tolerancia a sequía y las diferencias entre los cereales de invierno son muy distintas. En triticale la buena tolerancia a sequía está basada en pocas evidencias científicas (Cossani y col., 2007; Estrada-Campuzano y col., 2008), y es escasa la información sobre la sensibilidad de éste cultivo frente al déficit hídrico durante la etapa de llenado de grano. En el caso particular del sur de Chile, se desconoce en qué medida la capacidad de agua útil de los suelos Andisoles y las condiciones climáticas con relación a la disponibilidad hídrica pueden afectar al rendimiento potencial y los determinantes fisiológicos de la producción de biomasa de cereales invierno-primaverales.

1.6. Hipótesis

(1) Los rendimientos de trigo, cebada y triticale son afectados diferencialmente por un déficit hídrico moderado durante la etapa de llenado de grano en las condiciones del sur de Chile.

(2) El componente de rendimiento más sensible al déficit hídrico post-antesis es el peso de los granos en los tres cultivos mencionados.

(3) El déficit hídrico durante el llenado de grano afecta la producción de biomasa post-antesis de trigo, cebada y triticale, debido a una menor eficiencia en el uso de la radiación.

1.7. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis fue evaluar la respuesta al déficit hídrico moderado durante el llenado de los granos en cultivos de trigo, cebada y triticale en las condiciones agroclimáticas del sur de Chile.

1.8. Objetivos específicos

(1) Evaluar la respuesta del rendimiento de los cultivos de trigo, cebada y triticale a diferentes disponibilidades hídricas durante post-antesis en ambientes de alto potencial de rendimiento en el sur de Chile.

(2) Analizar la estabilidad de los componentes del rendimiento (número y peso de los granos) en condiciones de riego y secano post-antesis en trigo, cebada y triticale.

(3) Evaluar la producción de biomasa y sus determinantes fisiológicos (intercepción de radiación y eficiencia en el uso de radiación), durante el llenado de grano en los cultivos mencionados anteriormente bajo condiciones de riego y secano post-antesis.

1.9. Bibliografía

Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P., 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 14, 351–360.

Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A., 2002. Physiological changes associated with genetic improvement of grain yield in barley. In: Barley Science: Recent Advance from Molecular Biology to Agronomy of Yield and Quality. Food Product Press, New York, pp. 361-386.

Acevedo E., Craufurd, P.Q., Austin, R.B., Perez-Marco, P., 1991. Trait associated with high yield in barley in low-rainfall environments. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 116, 23-36.

AGRIMED, 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile, frente a escenarios de cambio climático. http://www.sinia.cl/1292/articles-46115-capitulo1-resumen.pdf

Bell, M.A., Fischer, R.A., 1994. Using yield prediction models to assess yield gains – a case study for wheat. Field Crops Research. 36, 161–166.

Byrnes, B., Bumb, B., 1998. Population growth, food production and nutrients requirements. Journal of Crop Production. 2, 1-27.

Brocklehurst, P.A., 1977. Factors controlling grain weight in wheat. Nature. 266, 348-9.

Calderini D., Dreccer M., Slafer G., 1995a. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and the latest trends. Plant Breeding. 114, 108-112.

Calderini, D.F., Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 1999b. Effect of temperature and carpel size during pre-anthesis on potential grain weight in wheat. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 132, 453–459.

Cochrane, M.P., Duffus, C.M., 1983. Endosperm cell number in cultivars of barley differing in grain weight. Annals of Applied Biology. 102, 177-81.

Cossani, C.M., Savin, R., Slafer, G.A., 2007 Contrasting performance of barley and wheat in a wide range of conditions in Mediterranean Catalonia (Spain). Annals of Applied Biology. 151, 167-173.

Cossani, C.M., Slafer G.A., Savin R. 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. Field Crops Research. 112, 205–213.

Czerednik, A., Nalborczyk, E., 2001. Physiological factors affecting yield formation in the canopy of traditional and new morphotypes of triticale plant (*Triticosecale Wittmack*). Acta Physiology Plant. 23, 87–93.

Dyson, T., 1999. Prospects for feeding the world. BMJ. 319, 988-990.

Ehdaie, B., Alloush, G.A., Madore, M.A., Waines, J.G., 2006b. Genotypic Variation for Stem Reserves and Mobilization in Wheat: II. Postanthesis Changes in Internode Water-Soluble carbohydrates. Crop Science. 46, 2093–2103.

Estrada-Campuzano, G., Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2008. Genotypic variability and response to water stress of pre and post anthesis phases in triticale. European Journal of Agronomy. 28, 171–177.

Evans, L.T., 1998. Feeding the Ten Billion (Plants and Population Growth). Cambridge University. Press, Cambridge. N.Y. 267 pp. ISBN 0-52T640814.

Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 105, 447–461.

Fokar, M., Blum, A., Nguyen, H.T., 1998. Heat tolerance in spring wheat. II. Grain filling. Euphytica. 104, 9–15.

French, R.J., Schultz, J.E., 1984a. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. Australian Journal of Agricultural Research. 35, 743–64.

French, R.J., Schultz, J.E., 1984b. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. Some limitations to efficiency. Australian Journal of Agricultural Research. 35, 765–775.

Giunta, F., Motzo, R., 2004. Sowing rate and cultivar affect total biomass and grain yield of spring triticale (*X Triticosecale Wittmack*) grown in a Mediterranean-type environment. Field Crops Research. 87, 179–193.

Giunta, F., Motzo, R., Deidda, M., 1993. Effect of drought on yield and yield components of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. Field Crops Research. 33, 399–409.

Gregory, P.J., Tennant, D., Belford, R.K., 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. Australian Journal of Agricultural Research. 43, 555-573.

IPCC, 2001a. Climate Chage 2001: the scientific basis, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, et al. Cambridge University Press.

IPCC, 2007. The Intergovernmental Panel on Climate Change, The 4th AR, UN.

Jamieson, P.D., Martin R.J., Francis G.S., Wilson, D.R., 1995. Drought effects on biomass production and radiation-use efficiency in barley. Field Crops Research. 43, 77–86.

Josephides, C.M., 1993. Analysis of adaptation of barley, triticale, durum and bread wheat under Mediterranean conditions. Euphytica. 65, 1–8.

Kobata, T., Palta, J.A., Turner, N.C., 1992. Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. Crop Science. 32, 1238–1242.

Laroche, G., Gate, P., 1996. Some physiological features of triticale and their consequences on crop management in France. In: Guedes-Pinto, H., Darvey, N. Carnide, V.P. (Eds.), Triticale: Today and Tomorrow. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 737–741.

López-Castañeda C. and Richards R.A., 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristic. Field Crops Research. 37, 51-62.

Lukaszewski, A.J., Gustafson, J.P., 1987. Cytogenetics of triticale. Plant Breeding. 5, 41-93.

O'Connell, M.G., O'Leary, G.J., Whitfield, D.M., Connor, D.J., 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. Field Crops Research.85, 111–124.

ODEPA, 2008. Situación de la producción y superficie sembrada de los cereales en Chile. https:// www. odepa .gob.cl /.

Palumbo, M., Boggini, G., 1994. Comparison of durum-wheat bread wheat and barley in a Mediterranean environment. Cereal Research Communications. 22, 113–120.

Peng, S., Cassman, K.G., Virmani, S.S., Sheehy, J., Khush, G.S., 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. Crop Science. 39, 1552–1559.

Risbey, J., Karoly, D., Reynolds, A., Braganza, K., 2003, Droughts and Climate Change, National Drought Forum 2003: Science for Drought, 8-11 April, Brisbane.

Rosenzweig, C., and D. Hillel, 1998: Climate Change and the Global Harvest: Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Oxford University Press.

Royo, C. 1992. El Triticale. Bases para el cultivo y aprovechamiento. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 96 p.

Salinger, M.J., Stigter, C.J., Das, H.P., 2000. Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change. Agricultural and Forest Meteorology. 103, 159-166.

Savin, R., Slafer, G.A., 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 116, 1–7.

Schnyder, H., 1993. The role of carbohydrate storage and redistribution in the source-sink relations of wheat and barley during grain filling-a review. New Phytologist. 123, 233-245.

Scott, W.R., Appleyard, M., Fellowes, G., Kirby, E.J.M., 1983. Effect of genotype and position in the ear on carpel and grain growth and mature grain weight in spring barley. Journal of Agricultural Science, Cambridge.100, 383–391.

Simpson, P.G., Siddique, K.H.M., 1994. Soil type influences relative yield of barley and wheat in a Mediterranean-type environment. Journal of Agronomy and Crop Science. 172, 147–160.

Sinclair, T.R., Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. Advances in Agronomy. 65, 215– 266.

Slafer, G.A., Savin, R., 1994. Source-sink relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. Field Crops Research.37, 39-49.

Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1991. Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum*) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world: a review. Euphytica. 58, 37-49.

Slafer, G.A., Calderini, D.F., Miralles, D.J., 1996. Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. In: M.P. Reynolds, S. Rajaram, and A.McNab (eds.), Increasing Yield Potential in wheat: Breaking the barriers. CIMMYT. Mexico. pp. 101-133.

Slafer, G.A., Rawson, H., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. Australian Journal of Plant Physiology. 21, 393–426.

Slafer, G.A., Satorre, E.H., Andrade, F.H., 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Slafer, G.A. (Ed.), Genetic Improvement of Field Crops. Marcel Dekker, New York, pp. 1–68.

Tollenaar, M., Wu, J., 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. Crop Science. 39, 1597-1604.

Ugarte, C., Calderini, D.F., Slafer. G.A., 2007. Grain weight and grain number responsiveness to pre anthesis temperature in wheat, barley and triticale. Field Crops Research. 100, 240-248.

Voltas, J., Romagosa, I., Araus, J.L., 1998. Growth and final weight of central and lateral barley grains under Mediterranean conditions as influenced by sink strength. Crop Science. 38, 84–89.

Wardlaw, I.F., 1994. The effect of high temperature on kernel development in wheat: variability related to pre-heading and post-anthesis conditions. Australian Journal of Plant Physiology. 21, 731–739.

Yunusa, I.A.M., Siddique, K.H.M., Belford, R.K., Karimi, M.M., 1993. Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use in spring wheat cultivars during preanthesis period in a Mediterranean-type environment. Field Crops Research. 35, 113-122.

2. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES NUMÉRICOS EN TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO EN POST-ANTESIS EN EL SUR DE CHILE

2.1. INTRODUCCIÓN

El sur de Chile se caracteriza por ser una zona de alto potencial de rendimiento para la producción de cereales invierno-primaverales los que se establecen principalmente en condiciones de secano (ODEPA, 2008). Sin embargo, las proyecciones de las necesidades de riego frente a escenarios de cambio climático, indican posibles restricciones hídricas especialmente en el período de post-antesis, esto es, cuando ocurre el llenado de grano en estos cultivos (AGRIMED, 2008). La ocurrencia de déficit hídrico al finalizar la estación de crecimiento de los cultivos sería la causa de disminuciones en el rendimiento de grano debido a incrementos de temperatura y evapotranspiración por cambios climáticos (IPCC, 2001a), lo cual implicaría una disminución de los rendimientos actuales de trigo, cebada y triticale.

En trigo, se ha reconocido que el rendimiento de grano está determinado por dos componentes principales: número de granos por m^2 y peso promedio de los mismos (Slafer y Rawson, 1994), de los cuales el número de granos ha sido fuertemente asociado con la respuesta a diferentes condiciones ambientales (por ejemplo Abbate y col., 1995 con nitrógeno; Valle y col., 2009 con aluminio; Cossani y col., 2009 con disponibilidad hídrica). Por otra parte, el peso de granos es generalmente menos explicativo del rendimiento aún cuando hay algunas pocas excepciones en trigo (Calderini y col., 1995a, 1999b). En cebada, el rendimiento de grano también está determinado principalmente por el

número de granos cosechados por unidad de área (Gallagher y col., 1975; Gales, 1983; Gambín y col., 2006). Para la determinación del primero de los componentes mencionados, sobre 20 días pre-antesis y 10 días post-antesis, se considera el período crítico para determinación del número de granos (Fischer, 1985; Savin y Slafer, 1991; Abbate y col., 1995), mientras que el potencial de peso de grano se define inmediatamente previo a la antesis y en las primeras etapas de post-antesis (Calderini y col., 1999b; Ugarte y col., 2007). Limitaciones hídricas durante el llenado de grano afectarían en mayor medida el peso de granos debido a efectos de déficit hídrico terminal en suelos Andisoles que presenta la zona sur Chile. Por ello, la comparación de cultivos como trigo, cebada y triticale durante esa etapa sería pertinente para evaluar las diferencias o similitudes que existen entre estos, de tal manera que se puedan tomar decisiones para los cultivos con las mejores características adaptativas a las condiciones futuras de la zona, tratando de minimizar el impacto negativo del déficit hídrico sobre los niveles de rendimientos actuales.

En ambientes mediterráneos, estudios comparativos entre trigo y cebada bajo riego y secano desde elongación de tallo a cosecha mostraron que el rendimiento de grano estuvo asociado principalmente con el número de granos por unidad de área en ambos tratamientos y cultivos (Cossani y col., 2009). Sin embargo, las conclusiones obtenidas para trigo y cebada en condiciones mediterráneas no han sido uniformes. En algunos casos los resultados han apoyado la hipótesis de que cebada tiene ventaja sobre trigo (Josephides, 1993; López-Castañeda y Richards, 1994), mientras que otros trabajos han evidenciado que la cebada no fue mejor que trigo en el mismo ambiente (Simpson y Siddique, 1994; Palumbo y Boggini, 1994; Cossani y col., 2009). En el caso de triticale hay

poca información sobre el tema, y menos información existe sobre el comportamiento de estos cultivos con diferente disponibilidad hídrica durante el llenado de granos en una misma evaluación experimental.

Aunque es bien sabido que los principales factores ambientales que determinan la tasa de desarrollo de los cultivos son la temperatura y el fotoperíodo (Slafer y Rawson, 1994), se ha informado que factores tales como la disponibilidad hídrica y los nutrientes podrían modificar la tasa de desarrollo de los cultivos (Longnecker y col., 1993; Otegui y col., 1995; Jalal Kamali y Boyd, 2000; Arisnabarreta y Miralles, 2004; Salvagiotti y Miralles, 2007). También la escasez de agua por estrés hídrico tienden a reducir el período de llenado de grano en triticale (Santiveri y col., 2002; García del Moral y col., 2005). En este sentido, evaluar la sensibilidad de trigo, cebada y triticale frente a un déficit hídrico moderado en post-antesis sería importante para conocer los alcances y limitaciones de este factor sobre el desarrollo y el rendimiento.

En el sur de Chile, no se conoce en qué medida la demanda ambiental puede implicar necesidades de riego durante el período de llenado de granos, especialmente en los suelos Andisoles característicos de esta zona. La comprensión de la sensibilidad comparativa de trigo, cebada y triticale al déficit hídrico terminal aún es limitada (Cossani y col., 2007). Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es analizar el impacto sobre el rendimiento de grano y otros caracteres asociados, frente al de déficit hídrico moderado durante post-antesis en cultivos de trigo, cebada y triticale.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Ubicación del experimento

El experimento se realizó en la Estación Experimental Santa Rosa de la Universidad Austral de Chile en Valdivia, en las coordenadas UTM (m) N 5.594. 300 E 651.105, Huso 18, a una altitud de 16 msnm. El suelo es derivado de cenizas volcánicas (medial mesic typic dystrandept) de la serie Valdivia, el cual presenta características de humedad aprovechable del 20% en base volumen, densidad aparente de 0,7 g cm^{-3} y 65% de porosidad total (Nissen, 1974).

2.2.2. Tratamientos

Se evaluaron tres especies de cereales de clima templado (trigo, cebada y triticale) y dos regímenes hídricos durante el período entre floración y madurez fisiológica (riego y secano) durante la temporada 2008/09. Los materiales vegetales utilizados fueron: un cultivar de trigo (cv. Pandora), uno de cebada (cv. Acuario) y otro de triticale (cv. Aguacero) proporcionados por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Los cultivares de las tres especies fueron seleccionados por presentar una fenología similar entre siembra y antesis, para evitar efectos confundidos debidos a diferencias en las duraciones de ciclo y las condiciones climáticas durante los mismos. Los regímenes hídricos incluyeron un tratamiento de riego y otro de secano durante post-antesis. La provisión de agua de ambos tratamientos correspondió a las precipitaciones más riegos complementarios hasta la antesis de cada cultivo. En el caso del tratamiento de riego se continuó la aplicación de riegos durante el período de post-antesis, mientras que el tratamiento de secano no incluyó ningún

riego adicional durante dicho período. Para el tratamiento de riego, el suministro de agua fue aplicado dos veces por semana; cada riego consistió en adicionar una carga de agua de 28 mm en cada parcela, mediante manguera distribuyendo el agua de manera homogénea entre las hileras. La cantidad de agua total aplicada en el tratamiento de riego post-antesis fue de 168 mm para trigo, 196 mm para cebada y 168 mm para triticale. Además, para estimar las diferencias de disponibilidad hídrica entre los tratamientos bajo riego y secano se hicieron dos muestreos de suelo (hasta 45 cm), uno en antesis (previo al inicio de los tratamientos de riego y secano post-antesis) y otro en madurez de cosecha en los tres cultivos. También se registró durante la estación de crecimiento la marcha de las precipitaciones, la evaporación, la temperatura y la radiación global en una estación climatológica (Davis, VANTAGE Pro 2, U.S.A.) ubicada en el campo experimental. La evapotranspiración del cultivo (ETc) se calculó mediante un software de la propia estación climatológica, usando la formula de Penman-Monteith y valores de k de los cultivos, propuestos por la Food and Agriculture Organization (FAO, 2006).

2.2.3. Manejo del trabajo experimental

El experimento se realizó mediante un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones, donde la parcela principal correspondió a los tratamientos de riego y secano y las subparcelas a los cultivos. La siembra se realizó el 23 de agosto de 2008, utilizando una densidad de 350 semillas m^{-2} en parcelas de 2 m de largo con 9 hileras de ancho distanciadas a 0,15 m. Para la siembra se utilizó un procedimiento especial para lograr una máxima uniformidad, donde las semillas fueron colocadas a una distancia de 1.9 cm entre ellas sobre una cinta adhesiva de 2 metros de largo y cubiertas con papel biodegradable para lograr la

estabilidad de las semillas. Luego, las cintas se colocaron dentro de los surcos a una profundidad de 2 cm y se taparon con suelo en forma manual.

El experimento fue fertilizado con 350 kg de nitrógeno, 300 kg de fósforo y 150 kg de potasio por hectárea. El fósforo y potasio se aplicaron en su totalidad al momento de la siembra por debajo de las cintas que contenían las semillas. La aplicación del nitrógeno se realizó en forma fraccionada, aplicando el 50% al momento de la siembra y el otro 50% en bandas al inicio del macollaje. Las fuentes de los fertilizantes fueron salitre potásico, superfosfato triple y cloruro de potasio, respectivamente. Las enfermedades fueron prevenidas o controladas mediante el uso de fungicidas (PRIORI y APACHE), siguiendo las indicaciones recomendadas por el fabricante. Las malezas fueron controladas periódicamente en forma manual.

2.2.4. Mediciones

Se registró la fecha de emergencia de los cultivos cuando más del 50% de las plantas se encontraban sobre la superficie del suelo. De igual forma se registraron los estados fenológicos de primer nudo (1N), bota (Bo), antesis (At), y madurez de cosecha, siguiendo la escala propuesta por Zadoks y col*.,* (1974).

Al final de la temporada, se realizó la cosecha de 1 m metro lineal en la hilera central de cada parcela. En cada muestreo se cosechó el área delimitada registrando el número de plantas. Posteriormente se eliminaron las raíces, se registro la altura de planta y cada planta fue separada en sus diferentes órganos. Después se registró la altura de planta (hasta la base de la espiga) y se separaron los diferentes órganos por categoría de vástago (vástago principal y macollos), en

tallos más vainas, espigas y material senescido. Las muestras fueron secadas a 60ºC durante 48 horas en una estufa de secado para la obtención del peso de tallos, peso de hojas y peso de espigas. En cada muestra los granos fueron separados de la espiga mediante trilla manual y secados en estufa a 60° C durante 48 horas. Las muestras fueron pesadas en una balanza analítica (Mettler Toledo). Se registró el rendimiento de la muestra y se obtuvo el peso de 1000 granos contando al azar 3 submuestras (de 100 granos cada una) de la muestra cosechada. Posteriormente se obtuvo el promedio el peso de las tres submuestras y se multiplicó por 10 para obtener el peso de 1000 granos. Se registró el número de granos por m^{-2} (NG) en función del peso de 100 granos multiplicado por el peso de la muestra total cosechada entre el peso de 100, también se registró el peso de los granos m^{-2} (PG), rendimiento de grano, tasa de crecimiento de grano y de cultivo e índice de cosecha (IC).

2.2.5. Análisis estadístico

Modelos de regresión linear fueron usados para evaluar la asociación entre variables. Con los datos obtenidos de producción de biomasa y componentes del rendimiento, se realizaron los análisis de varianza considerando un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones mediante el programa estadístico SAS versión 9.0. Cuando los valores de F de los análisis de varianza resultaron significativos, se procedió a realizar la comparación de medias mediante la prueba de LSD al 5% de significancia ($p<0,05$).

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Condiciones Climáticas

Durante todo el ciclo de crecimiento de los cultivos (entre agosto de 2008 y enero de 2009) se registró una precipitación acumulada de 644 mm, de los cuales aproximadamente el 90% ocurrió durante el período de pre-antesis y el restante 10% durante el período de post-antesis (Fig. 3). Al momento de antesis y durante post-antesis se observaron precipitaciones ligeras. Las precipitaciones registradas durante los meses de diciembre y enero fueron de 28 y 17 mm, respectivamente (Fig. 3). Estos valores representan una disminución de las precipitaciones, con relación al promedio de las últimas cincuenta temporadas, del 68 y 75% para los meses de diciembre y enero, respectivamente. Lo cual muestra que fue un año particularmente más seco durante los meses considerados en esta tesis.

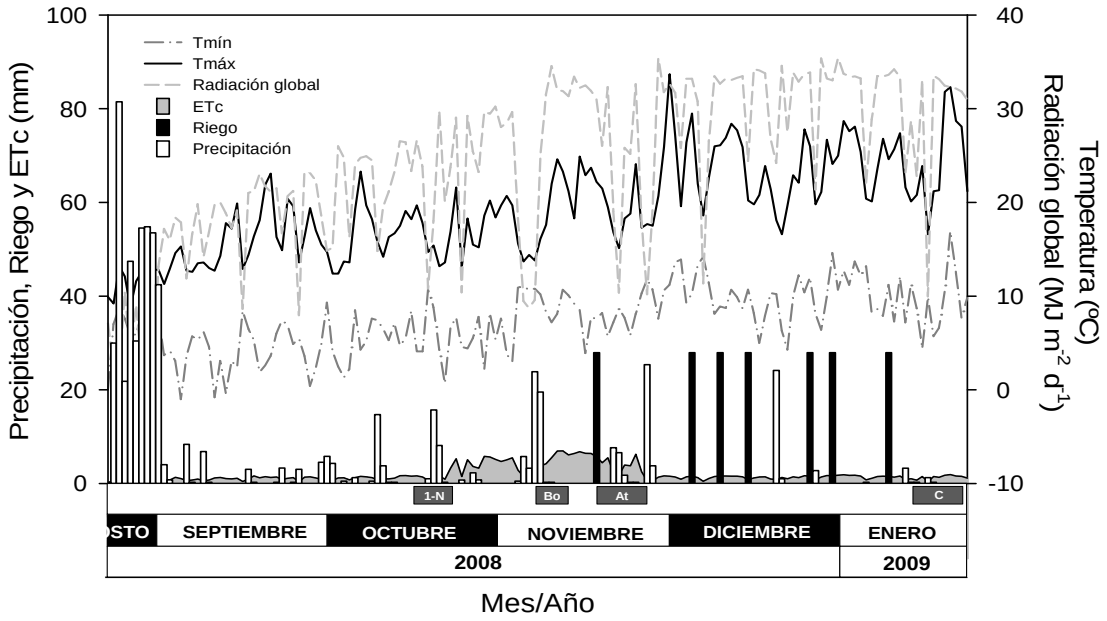

Fig. 3. Precipitación, evapotranspiración del cultivo (ETc), temperatura, radiación global y aplicación de riego post-antesis durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. 1N, primer nudo; Bo, bota; At, antesis; C, cosecha.

La temperatura promedio observada durante el mes de diciembre fue similar con relación al promedio de las últimas treinta temporadas (17ºC), mientras que en enero la temperatura promedio disminuyó 1,7ºC con relación al promedio de las últimas treinta temporadas (18ºC) en el mismo mes. Durante el ciclo del cultivo se registraron temperaturas máximas de hasta 33,7ºC (en el mes de diciembre).

La radiación global promedio durante la temporada 2008/09 fue de 24 y 23 MJ, en los meses de enero y diciembre, respectivamente. Durante la evaluación de este experimento la radiación global se incrementó durante pre-antesis debido a una menor radiación difusa por efecto de nubosidad y con posterioridad a la antesis la incidencia de radiación fue relativamente estable con cielos despejados (Fig. 3).

2.3.2. Humedad del suelo

Los muestreos de suelo realizados en antesis (inmediatamente antes de iniciarse los tratamientos de riego y secano post-antesis) mostraron disponibilidades hídricas similares entre tratamientos de riego y secano para trigo, cebada y triticale, hasta los 45 cm de profundidad. Lo contrario ocurrió a cosecha dónde se observaron contenidos cercanos al punto de marchitez permanente en los tratamientos de secano con claras diferencias respecto al tratamiento de riego en cada uno de los cultivos (Fig. 4). En general, se encontró menor disponibilidad hídrica a profundidades de 0-15 y 15-30 cm en suelos donde se aplicó el tratamiento de secano post-antesis en todos los cultivos evaluados. En madurez de cosecha, de 30-45 cm de profundidad en suelo, no se mostraron valores menores al punto de marchites permanente en los tres cultivos evaluados

como se muestra en la Fig. 4. El tratamiento de riego-post antesis utilizado en este experimento aportó agua a una profundidad estimada entre 7-10 cm.

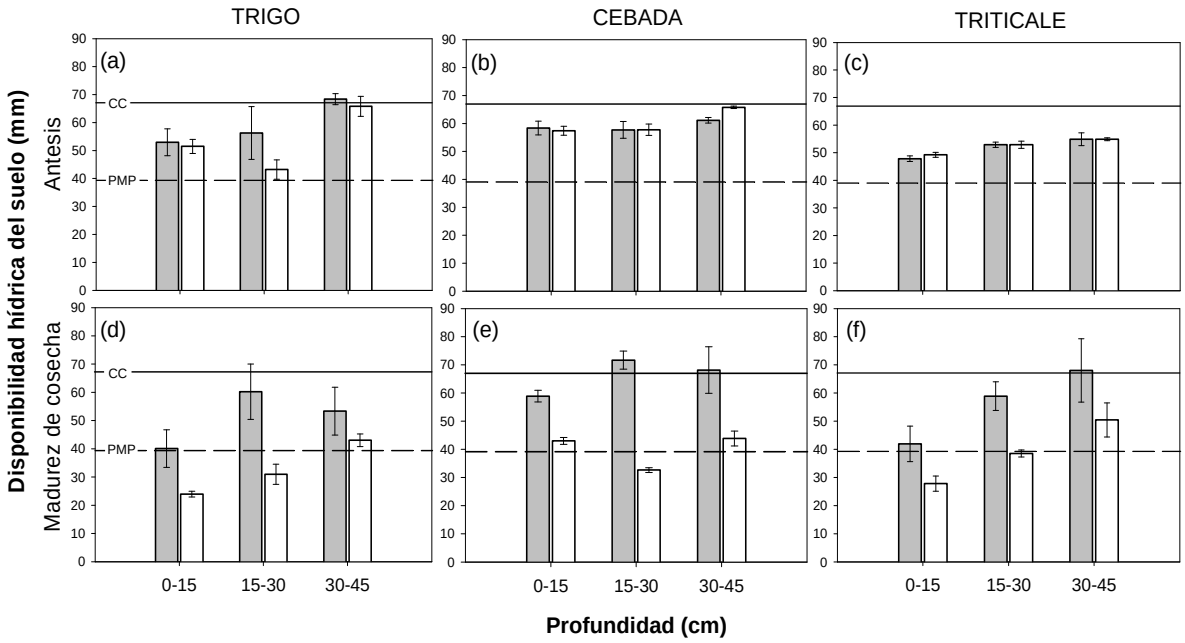

Fig. 4. Disponibilidad hídrica del suelo a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm en antesis (a, b y c) y madurez de cosecha (d, e y f) en trigo, cebada y triticale en los tratamientos de riego (barras grises) y secano (barras blancas) post-antesis. CC, capacidad de campo (45%V) y PMP, punto de marchitez permanente (26%V). Valores de CC y PMP son estimados de información proporcionada por Dörner, Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos.

2.3.3. Fenología de los cultivos

La fecha de emergencia en trigo (5 de septiembre) se retrasó en dos días en comparación con la de cebada y triticale, donde ambos cultivos coincidieron en la emergencia (03 de septiembre). En etapas posteriores, después de la emergencia el primer nudo se registró primero en trigo (44 días), siguiéndole cebada (47 días) y luego triticale (48 días), mientras que la duración entre período primer nudo-bota fue menor en cebada (19 días) comparado con trigo (24 días) y triticale (20 días). La duración del período de bota-antesis, fue menor en cebada (10 días) en

comparación con trigo (12 días) y triticale (14 días). Las diferencias en la duración del período antesis-madurez fisiológica entre cultivos se mantuvieron, observándose una duración de 38, 39 y 43 días en cebada, trigo y triticale, respectivamente (Fig. 5). Los tratamientos de riego y secano post-antesis no causaron diferencias (p>0,05) sobre la duración de éste mismo período.

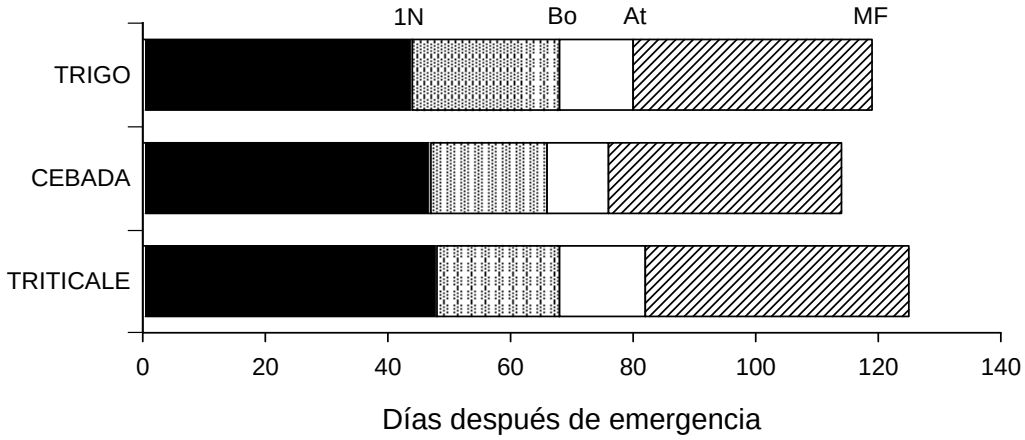

Fig. 5. Fases fenológicas después de emergencia en tres cultivos evaluados en Valdivia en la temporada 2008/09. Las barras muestran la duración de cada fase fenológica: emergencia-primer nudo (1N, barras negras), primer nudo-bota (Bo, barras punteadas), bota-antesis (At, barras blancas) y antesis-madurez fisiológica (MF, barras rayadas).

2.3.4. Rendimiento de grano y atributos de los cultivos

La comparación entre cultivos mostró diferencias significativas en el rendimiento de grano, la producción de biomasa aérea (p<0,05) y la altura de plata, pero no (p>0,05) en el IC (Cuadro 3). El régimen hídrico no afectó (p>0,05) el rendimiento de grano, la producción de biomasa aérea, la altura de planta, ni el IC. Tampoco se encontró interacción (p>0,05) entre las fuentes de variación. Los coeficientes de variación fueron relativamente bajos para todas las variables en estudio. Entre cultivos, triticale mostró mayor rendimiento de grano que trigo y cebada (Cuadro 2). El triticale alcanzó 25 y 18% mayor producción de

biomasa aérea que trigo y cebada, respectivamente. También, tritricale alcanzó mayor altura de planta, siguiéndole trigo, y cebada en último lugar con menor altura de planta. La biomasa mostró asociación positiva (r^2=0,96; p<0,05) con la altura de planta en los tres cultivos evaluados. Por otra parte, la partición de biomasa no varió entre los cultivos ya que no se encontraron diferencia entre los IC. El IC entre cultivos estuvo en un rango de 0.50 a 0,52 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento de grano, producción de biomasa aérea, altura de planta e índice de cosecha de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09.

Régimen hídrico	**Cultivo**	**Rendimiento de grano** (t ha^{-1})	**Biomasa Aérea** (g m^{-2})	**Altura de planta** (m)	**Índice de cosecha**
Riego	Trigo	10.0 b†	1960.7 c	0.70 d	0.53 a
	Cebada	11.0 ab	2178.8 bc	0.80 c	0.50 a
	Triticale	12.9 a	2528.9 ab	1.00 b	0.50 a
Secano	Trigo	10.9 ab	2193.5 bc	0.77 c	0.50 a
	Cebada	10.8 ab	2235.2 abc	0.80 c	0.50 a
	Triticale	12.8 a	2665.2 a	1.07 a	0.50 a
	LSD(0.05)	2.3	436.8	0.04	0.04
			Promedios		
	Trigo	10.5 b	2077.1 b	0.73 c	0.52 a
	Cebada	10.9 b	2207.0 b	0.80 b	0.50 a
	Triticale	12.8 a	2597.1 a	1.03 a	0.50 a
	LSD(0.05)	1.6	311.4	0.03	0.03
	Cultivo	*	*	***	ns
	R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	C.V.(%)	10.7	10.2	2.80	4.70

† Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

La comparación entre tratamientos de riego y secano post-antesis mostró que las diferencias en rendimiento y biomasa aérea se encontraron principalmente en el tratamiento de riego, en dónde triticale superó a trigo y cebada con 29 y 17% más en el rendimiento, respectivamente y 30 y 16% más en

la biomasa, respectivamente. El general, rendimiento de grano en los cultivos estuvo positivamente correlacionado con la biomasa aérea y la altura de planta ($p<0.001$), independientemente de la especie de cultivo y el régimen hídrico (Fig. 6).

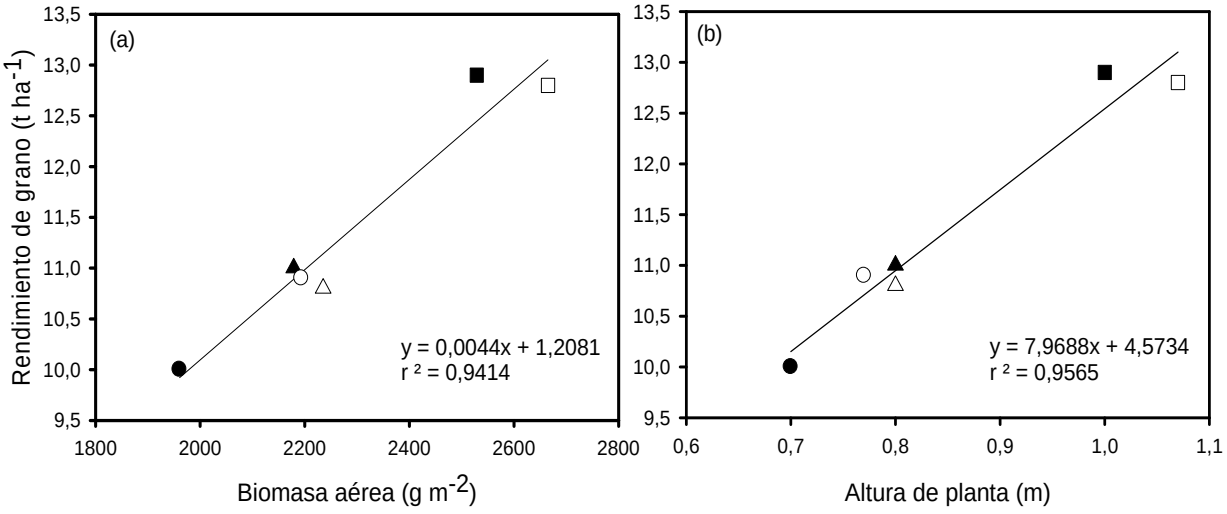

Fig. 6. Relación entre el rendimiento de grano y (a) la biomasa aérea y (b) la altura de planta en trigo (círculos) cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis.

2.3.5. Componentes numéricos del rendimiento

Se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) entre cultivos en el peso de 1000 granos, pero no ($p>0,05$) sobre el número de granos m^{-2}. Por otra parte, si los hubo ($p<0,001$) para los componentes del número de espigas por unidad de superficie y número de granos por espiga. El régimen hídrico y la interacción régimen hídrico por cultivo no afectaron significativamente ($p>0,05$) el número de granos por m^2, ni sus subcomponentes (número de espigas por m^2 y número de granos por espiga). El peso de 1000 granos tampoco se vió modificado por el régimen hídrico. El coeficiente de variación de peso de 1000

granos fue relativamente bajo (3.6%) comparado con los coeficientes de variación de las demás variables mencionadas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Número de granos por m^{-2}, peso de 1000 granos, número de espigas por m^{-2} y número de granos por espiga de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09.

Régimen hídrico	Cultivo	Número de granos (m^2)	Peso de 1000 granos (g)	Número de espigas (m^2)	Número de granos esp^{-1}
Riego	Trigo	20093 a†	50.2 abc	487 b	41 b
	Cebada	21726 a	50.7 ab	1105 a	20 c
	Triticale	24286 a	53.1 a	411 b	59 a
Secano	Trigo	22869 a	47.3 c	522 b	44 b
	Cebada	22280 a	48.7 bc	1196 a	17 c
	Triticale	25244 a	50.9 ab	422 b	60 a
	LSD(0.05)	5234	3.4	118	6
			Promedios		
	Trigo	21481 a	48.8 b	505 b	42 b
	Cebada	22003 a	49.7 ab	1150 a	19 c
	Triticale	24765 a	52.0 a	417 c	59 a
	LSD(0.05)	3736	2.4	84	4
	Cultivo	ns	*	***	***
	R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	C.V. (%)	12	3.6	9	8

† Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

El rendimiento de grano estuvo relacionado ($p<0.001$) positivamente con número de granos en los tres cultivos evaluados y en menor medida con el peso de 1000 granos (Fig. 7). El número de granos fue similar ($p>0.05$) en todos los tratamientos, i.e. cultivos y regímenes hídricos. Entre cultivos, triticale mostró 7% mayor peso de granos que trigo, mientras que cebada no difirió en el peso de granos comparado con trigo y triticale. Respecto a los subcomponentes del número de granos m^{-2}, las diferencias ($p<0.001$) entre

cultivos indican que cebada expresó mayor número de espigas por m^2 (1150 m^2), es decir, 645 y 733 más que trigo y triticale, respectivamente. El triticale logró el mayor número de granos por espiga con 17 y 40 granos más que trigo y cebada, respectivamente.

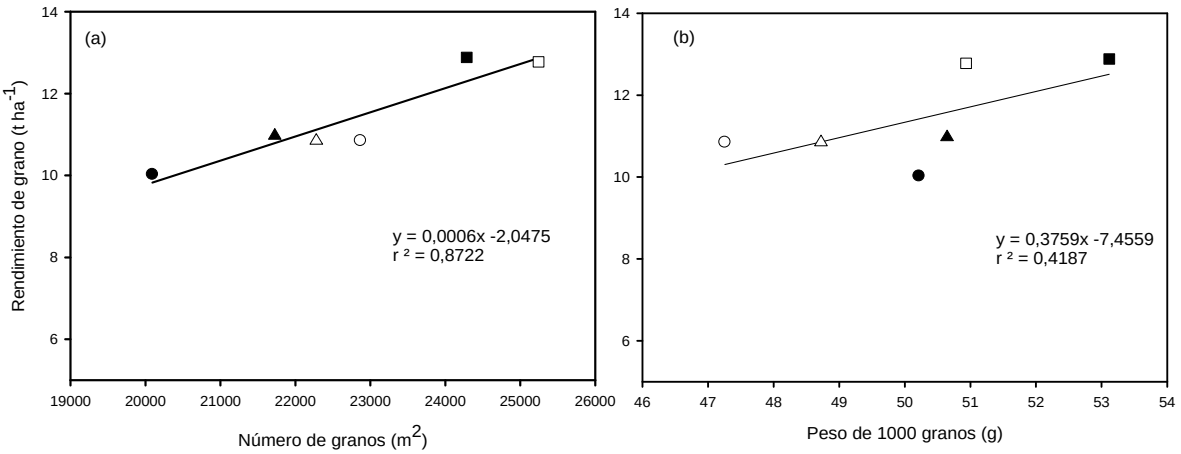

Fig. 7. Relación entre el rendimiento y (a) el número de granos m^{-2} y (b) el peso de 1000 granos en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis.

Al compararse el peso de grano entre régimen hídrico, el peso de 1000 granos fue mayor en los cultivos bajo tratamiento de riego que bajo el tratamiento de secano (Cuadro 3; Fig. 7b). En ambos tratamiento de riego y secano post-antesis, la cebada mostró mayor número de espigas por m^{-2}, sin diferencias entre trigo y triticale, indistintamente del régimen hídrico. El número de granos por espiga fue marcadamente diferente entre los tres cultivos ($p<0,001$), indistintamente del régimen hídrico (Cuadro 3). El peso de grano estuvo más estrechamente asociado con la duración del llenado de grano que con la tasa de crecimiento de los granos (Fig. 8), entre tratamientos de régimen hídrico y cultivos.

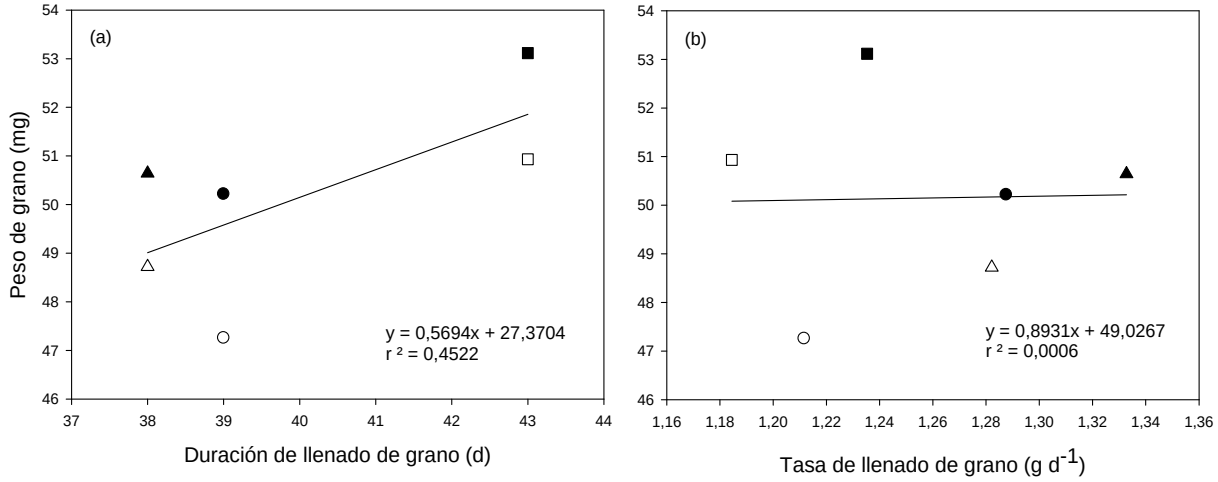

Fig. 8. Relación entre el peso de grano y (a) la duración de llenado de grano y (b) la tasa de llenado de grano en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) en los tratamientos de riego (símbolos cerrados) y secano (símbolos abiertos) en post-antesis.

2.3.6. Partición de biomasa a cosecha

Los cultivos mostraron diferencias significativas en el peso de tallos ($p<0,05$), peso de hojas, peso de espigas y la relación número de granos por unidad de biomasa de espiga (NG/PE). Por el contrario, el régimen hídrico no afectó ($p>0,05$) el peso de éstos órganos ni la relación NG/PE. La interacción entre las fuentes de variación no fue significativa ($p>0.05$). Es importante señalar que los coeficientes de variación fueron relativamente bajos en todas las variables de estudio (Cuadro 4). En la partición de biomasa a espiga, el triticale alcanzó 17 y 27 % mayor peso de espiga que trigo y cebada respectivamente, estos dos últimos cultivos con similar peso de espiga. Los pesos promedios de tallos y hojas fueron menores en trigo que en cebada y triticale, mientras que estos dos últimos cultivos mostraron similar peso de tallos y hojas (Cuadro 4). En la relación número de grano por peso de espiga entre cultivos, cebada mostró una

mejor relación, siguiéndole triticale y trigo en último lugar con una menor relación NG/PE.

Cuadro 4. Peso de espigas, tallos y hojas y la relación número de grano por peso de espiga (NG/PE) de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09

Régimen hídrico	Cultivo	Peso seco de espigas	Peso seco de tallos	Peso seco de hojas	NG/PE
		(g m^{-2})			(%)
Riego	Trigo	1264.2 b	553.2 d†	143.3 c	80.4 bc
	Cebada	1224.7 b	708.3 bc	245.8 a	89.6 a
	Triticale	1567.3 a	759.7 ab	201.7 ab	82.5 b
Secano	Trigo	1400.2 ab	619.8 cd	173.5 bc	77.3 c
	Cebada	1227.3 a	767.7 ab	240.2 a	88.4 a
	Triticale	1557.3 a	867.2 a	240.7 a	82.1 b
	LSD(0.05)	279.1	128.8	49.5	4.1
		Promedios			
	Trigo	1332.2 b	586.5 b	158.4 b	78.8 c
	Cebada	1225.9 b	738.0 a	243.0 a	89.0 a
	Triticale	1562.3 a	813.5 a	221.2 a	82.3 b
	LSD(0.05)	199.2	91.6	35.5	2.9
	Cultivo	*	**	**	***
	R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	C.V. (%)	10.9	9.7	12.8	2.7

† Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

A pesar de no encontrarse diferencias ($p>0.05$) entre régimen hídrico sobre el peso de espigas y peso de tallos, el triticale destacó con los mayores pesos en comparación con trigo y cebada en ambos tratamientos de riego y secano post-antesis. La cebada igualmente mostró una mejor relación NG/PE en ambos tratamientos de riego y secano post-antesis con valores de 89.6 y 88.4%, respectivamente.

2.4. DISCUSIÓN

El régimen hídrico no afectó significativamente la duración del ciclo de crecimiento entre cultivos bajo tratamientos de riego y secano post-antesis. El tratamiento de riego-post antesis utilizado en este experimento aportó agua a una profundidad aproximada de 20 cm. La ocurrencia de antesis estuvo en un rango de 7 días en trigo, cebada y triticale; esto permite afirmar que la fecha de antesis fue similar en los tres cultivos y que las diferencias entre estos frente al factor régimen hídrico y las condiciones ambientales pueden atribuirse a las características de cada cultivo. La duración del ciclo de crecimiento de los cultivos pudo haber explicado las diferencias en el rendimiento entre cultivos, ya que triticale presentó la mayor duración (127 días) y el mayor rendimiento de grano (12,8 t ha^{-1}) en sus ciclo de crecimiento comparado con el resto de los cultivos evaluados, mientras que cebada presentó un ciclo de crecimiento y rendimiento de grano (119 días y 10.9 t ha^{-1}, respectivamente), similar con trigo (114 días y 10,5 t ha^{-1}, respectivamente).

Los rendimientos de grano en trigo, cebada y triticale fueron asociados con el componente número de granos por m^2 y no con el peso de grano (peso de 1000 granos), independientemente del régimen hídrico. Lo anterior reafirma lo reportado en la literatura, cuando se evaluaron estos en ambientes mediterráneos (Cossani y col., 2009). El rendimiento de grano en los cultivos evaluados fue correlacionado con una mayor producción de biomasa y altura de planta a cosecha, donde una mayor altura significó mayor biomasa aérea y altos rendimientos (Fig. 6). El IC mostró diferencias no significativas entre cultivos, estos valores están en acuerdo con los datos reportados en

experimentos donde evaluaron cultivares de trigo modernos (Sayre y col., 1997; Calderini y col., 1999b; Brancourt-Hulmel y col., 2003; Shearman y col., 2005).

El peso de tallos a cosecha fue menor en trigo comparado con cebada y triticale. La removilización de asimilados de tallos a espigas en post-antesis para los tres cultivos se calculó de la diferencia entre biomasa de tallos entre madurez y antesis; esto reflejó que trigo tuvo 21% de removilización de asimilados de tallos hacia la espiga, mientras que cebada y triticale solo removilizaron el 14 y 1%, respectivamente, de los asimilados acumulados durante el período de post-antesis. Una mejor removilización de asimilados en el caso particular de trigo se ha reportado en literatura (Ehdaie y col., 2006a). Sin embargo, Kiniry (1993) indica que por cada unidad de asimilados translocada hacia los granos, el 20% se utiliza en respiración, lo cual explicaría los valores negativos de producción de biomasa post-antesis encontrados en la presente tesis. Si bien, cebada y triticale no mostraron diferencias en el peso seco de tallos a cosecha, este último logro el mayor peso de tallos, posiblemente por una menor removilización de asimilados y un mejor sistema de raíces que le permitieron mayor aprovechamiento de la disponibilidad hídrica en el caso de triticale (Lukaszewski y Gustafson, 1987; Royo, 1992).

La relación NG/PE explica las diferencias de peso de capotillo entre cultivos. La mejor relación en el número de granos por peso de espiga se mostró en cebada (89%), siguiéndole triticale (82%) y trigo (79%), lo cual indica que trigo tiene mayor partición de asimilados a favor del capotillo durante el crecimiento de la espiga. La particularidad de cebada con mayor valor de relación

de NG/PG podría estar relacionada con sus características de biología floral de la espiga por ser una planta de dos carreras.

La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos de riego y secano post-antesis sobre el rendimiento de grano en los tres cultivos evaluados no permite concluir cuál de ellos posee características de mejor adaptación ante déficit hídrico terminal. Sin embargo, mayor rendimiento de grano y biomasas aérea en triticale comparado con trigo y cebada en los tratamientos de riego y secano post-antesis podrían atribuirse a una mayor captura de radiación o una mejor eficiencia de uso de radiación durante el período de post-antesis.

La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos de riego y secano post-antesis sobre la disponibilidad hídrica en suelo a 30-45 cm de profundidad como se muestra en la Fig. 4, son atribuidos principalmente a la capacidad de los suelos trumao para retener humedad. Lo anterior indicaría que el agua útil disponible para los cultivos es suficiente para no afectar de manera importante los rendimientos de grano, particularmente hasta llenado de grano cuando son determinados los componentes del rendimiento número de granos (Fischer, 1985; Savin y Slafer, 1991; Abbate y col., 1995) y peso de granos (Calderini y col., 1999b; Ugarte y col., 2007). El comportamiento de las precipitaciones en el año fue anormal por presentarse un período de lluvias más estrecho durante el ciclo de crecimiento. Más allá de la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos de riego y secano post-antesis, es evidente que en la zona posibles limitaciones hídricas en el futuro mediato podrían afectar el peso de grano en cereales, según los datos presentados en esta tesis (Cuadro 3), en

donde se muestra que peso de 1000 granos fue menor en tratamiento de secano post-antesis comparado con el tratamiento de riego post-antesis en los tres cultivos evaluados. Lo anterior permite afirmar que los efectos de cambio climático podrían afectar de manera leve los rendimientos actuales por exposición de los cultivos a períodos más prolongados con ausencia de lluvias durante el llenado de grano en el sur de Chile (IPCC, 2001a).

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten concluir que el déficit hídrico moderado no modificó los componentes numéricos del rendimiento al menos en el suelo trumaos en donde se evaluó el experimento. Además, alto rendimiento de grano en triticale en comparación a trigo y cebada fue asociado con la alta producción de biomasa.

2.5. Bibliografía

Abbate, P.E., Andrade, F.H. Culot, J.P., 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 14, 351–360.

AGRIMED, 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile, frente a escenarios de cambio climático.http://www.sinia.cl/1292/articles-46115_capitulo1_resumen. pdf

Arisnabarreta, S., Miralles, D.J., 2004. The influence of fertilizer nitrogen application on development and number of reproductive primordia in field-grown two- and six-rowed barleys. Australian Journal of Agricultural Research. 55, 357–366.

Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Berard, P., Le Buanec, B., Trottet., M. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. Crop Science. 43, 37–45.

Calderini, D., Dreccer, M., Slafer, G., 1995a. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and the latest trends. Plant Breeding. 114: 108-112.

Calderini, D.F., Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 1999b. Effect of temperature and carpel size during pre-anthesis on potential grain weight in wheat. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 132, 453–459.

Cossani, C.M., Savin, R., Slafer, G.A., 2007 Contrasting performance of barley and wheat in a wide range of conditions in Mediterranean Catalonia (Spain). Annals of Applied Biology. 151, 167-173.

Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. Field Crops Research. 112, 205–213.

Ehdaie, B., Alloush, G.A., Madore, M.A., Waines, J.G., 2006b. Genotypic Variation for Stem Reserves and Mobilization in Wheat: II. Postanthesis Changes in Internode Water-Soluble carbohydrates. Crop Science. 46, 2093–2103.

FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm

Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 105, 447–461.

Gales, K., 1983. Yield variation of wheat and barley in Britain in relation to crop growth and soil conditions—a review. Journal of the Science of Food and Agriculture**.** 34, 1085–1104.

Gallagher, J.N., Biscoe, P.V., Scott, R.K., 1975. Barley and its environment V. Stability of grain weight. Journal of Applied Ecology. 12, 319–336.

Gambín, B.L., Borrás, L., Otegui, M.E., 2006. Source–sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids. Field Crops Research. 95, 316–326.

Garcia del Moral, L.F., Rharrabti, Y., Elhani, S., Martos, V., Royo, C., 2005. Yield formation in Mediterranen durum wheats under two contrasting wáter regimes based on path-coefficient analysis. Euphytica 146, 203–212.

IPCC, 2001a. Climate Chage 2001: the scientific basis, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, et al. Cambridge University Press.

Jalal Kamali, M.R., Boyd, W.J.R., 2000. Quantifying the growth and development of commercial barley cultivars over two contrasting growing seasons in Western Australia. Australian Journal of Agricultural Research. 51, 487–501.

Josephides, C.M., 1993. Analysis of adaptation of barley, triticale, durum and bread wheat under Mediterraneran conditions. Euphytica, 65, 1-8.

Kiniry, J.R., 1993. Nonstructural carbohydrate utilization by wheat shaded during grain growth. Agronomy Journal. 85, 844–849.

Longnecker, N., Kirby, E.J.M., Robson, A., 1993. Leaf Emergence, tiller growth and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. Crop Science. 33, 154–160.

López-Castañeda C., Richards R.A., 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristic. Field Crops Research. 37, 51-62.

Lukaszewski, A.J., Gustafson, J.P., 1987. Cytogenetics of triticale. Plant Breed. 5, 41-93.

Nissen, J.P., 1974. Estudio Agrologico del predio experimental "Santa Rosa". Istituto de suelos y abonos. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 46 pp.

ODEPA, 2008. Situación de la producción y superficie sembrada de los cereales en Chile. https:// www. odepa .gob.cl /.

Otegui, M.E., Andrade, F.H., Suero, E.E., 1995. Growth, water use and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Research. 40, 87–90.

Palumbo, M., Boggini, G., 1994. Comparison of durum-wheat bread wheat and barley in a Mediterranean environment. Cereal Research Communications. 22, 113–120.

Royo, C., 1992. El Triticale. Bases para el cultivo y aprovechamiento. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 96 p.

Salvagiotti, F., Miralles, D.J., 2007. Wheat development as affected by nitrogen and sulfur nutrition. Australian Journal of Agricultural Research. 58, 39–45.

Santiveri, F., Royo, C., Romagosa, I., 2002. Patterns of grain filling of spring and winter hexaploid triticales. European Journal of Agronomy. 16, 219–230.

Savin, R., Slafer, G.A., 1991. Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 116, 1–7.

Sayre, K.D., Rajaram S., Fischer, R.A. 1997., Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. Crop Science. 37, 36–42.

Shearman, V.J., Sylvester-Bradley, R., Scott, R.K., Foulkes, M.J., 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in UK. Crop Science. 45, 175–185.

Simpson, P.G., Siddique, K.H.M., 1994. Soil type influences relative yield of barley and wheat in a Mediterranean-type environment. Journal of Agronomy and Crop Science. 172, 147–160.

Slafer, G.A., Rawson, H., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. Australian Journal of Plant Physiology. 21, 393–426.

Ugarte, C., Calderini, D.F., Slafer. G.A. 2007. Grain weight and grain number responsiveness to pre anthesis temperature in wheat, barley and triticale. Field Crops Research. 100, 240-248.

Valle, S.R., Carrasco, J., Pinochet, D., Calderini, D., 2009. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitivewheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. Plant and Soil. 318, 299–310.

Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research. 14, 415–421.

3. BIOMASA, INTERCEPCION DE RADIACIÓN Y EFICIENCIA DEL USO DE LA RADIACIÓN EN TRIGO, CEBADA Y TRITICALE BAJO RIEGO Y SECANO EN POST-ANTESIS EN EL SUR DE CHILE

3.1. INTRODUCCIÓN

La producción de biomasa puede ser descrita por la captura y la transformación de la radiación solar incidente. La IR es una función del índice de área foliar verde y de la duración y eficiencia con que ésta intercepta la radiación solar, mientras que la EUR es descrita como la pendiente entre la biomasa producida durante el ciclo de crecimiento del cultivo y la radiación interceptada acumulada (IRa). La IR puede ser afectada por la estructura de la canopia (Sadras, 1996) y la morfología de las espigas (Thorne y col., 1988; Motzo y Giunta, 2002). La EUR varía con la especie vegetal (Sinclair y Muchow, 1999; O`Connell y col., 2004), la ontogenia del cultivo (Calderini y col., 1997; Plénet y col., 2000b; Lecoeur y Ney, 2003), la disponibilidad hídrica (Jamieson y col., 1995; Earl y Davis, 2003; Tesfaye y col., 2006), la presión de vapor (Kemanian y col., 2004), el nitrógeno (Hall y col., 1995) y otros nutrientes.

Las diferencias en la eficiencia de IR entre cultivos, pueden estar determinadas por aspectos fisiológicos de cada especie, que pueden ser importantes en condiciones de limitación hídrica. Por ejemplo, la ventaja en el crecimiento de cebada sobre trigo cuando se siembra de forma simultánea en el mismo ambiente se atribuye a un mayor vigor de las plántulas de cebada (Gregory 1992; López-Castañeda y Richards, 1994). El vigor temprano describe la rápida expansión de la superficie foliar y consecuentemente, una mayor producción de biomasa (Turner y Nicolás, 1998; Richards y Lukács, 2002). Por

ejemplo, en genotipos de trigo vigorosos se ha reportado mayor área foliar y biomasa de tallo en comparación con genotipos no vigorosos (Rebetzke y Richards, 1999; Richards y Lukács, 2002). La eficiencia de IR puede ser también relevante en otros momentos de la ontogenia de los cultivos ante limitación hídrica si se considera que las plantas pueden modificar su estructura de canopia y ángulo de inclinación de hojas durante el llenado de grano. De este modo, diferencias en la sensibilidad de cada cultivo frente a déficit hídrico moderado podría modificar la IR (Sinclair y Muchow, 1999).

Referido al otro determinante fisiológico de la producción de biomasa, la EUR, es aceptado que dentro del grupo de cultivos C3, los cereales presentan una mayor EUR en comparación con las leguminosas (Sinclair y Muchow, 1999). Los cultivos de trigo y cebada, bajo condiciones no limitantes de agua y nutrientes muestran valores similares de EUR (cercanos a 1,7 g MJ^{-1}). Los efectos de estrés hídrico pueden reducir la fotosíntesis de hoja y por lo tanto la EUR. Por ejemplo, en estudios con trigo se han reportado valores de EUR de 0.91 g MJ^{-1} en condiciones de déficit hídrico en Australia (O`Connell y col., 2004). En cebada, por otra parte, se han encontrado disminuciones de EUR bajo sequía, en donde el máximo valor registrado fue de 1,16 g Mj^{-1}(Jamieson y col., 1995), los autores mostraron que la sequía impuesta desde dos semanas antes o después de la antesis redujo la biomasa producida. Por otro lado, en algunos estudios donde evaluaron cebada, trigo pan y trigo duro bajo riego y secano a distintos niveles de nitrógeno los autores reportaron incrementos en la producción de biomasa total en tratamientos con riego (Cossani y col., 2009). Lo anterior permite señalar que podría haber comportamientos diferentes entre estos cultivos al déficit hídrico. En estudios con triticale donde se evaluaron diferentes

densidades de siembra bajo dos regímenes hídricos (riego y secano), no se encontraron diferencias en el rendimiento, justificando esto el uso de triticale en altas densidades, (300 plantas m^{-2}) en las que se registró una EUR promedio de 1.37 g MJ^{-1} y una IR total promedio de 1653 MJ m^{-2} (Giunta y Motzo, 2004). En un estudio con triticale y trigo duro en condiciones potenciales la EUR fue similar entre ambos cultivos, 1,27 y 1,1 g MJ^{-1} respectivamente (Giunta y col., 2009). En general, existen relativamente pocos estudios sobre la respuesta y estabilidad de la EUR durante llenado de grano bajo condiciones de déficit hídrico. En el caso particular de trigo, cebada y triticale hay poca información donde se comparen estos cultivos en un mismo experimento.

La eficiencia de conversión de la IR a materia seca entre cereales difiere entre períodos de pre y post-antesis (Gregory y col., 1992). Por ejemplo, se ha encontrado que el cultivo de cebada presenta una maduración rápida y un período corto de llenado de grano en comparación con trigo (Yasuda, 1989; Acevedo y col., 1990). También, en estudios donde se compararon cebada y trigo bajo tratamientos de riego y secano bajo distintos niveles de nitrógeno, se encontró que las diferencias en la biomasa total entre estas especies fueron directa y positivamente relacionados (r^2=0.86) con sus diferencias de crecimiento en post-antesis. Estas diferencias mostraron asociación con el número de granos por unidad de área establecidos en cada situación y cultivo (Cossani y col., 2009). Algunos estudios donde compararon cultivares de trigo antiguos y modernos indicaron incrementos de EUR en post-antesis para los cultivares modernos (Calderini y col., 1997; Miralles y Slafer, 1997). Los autores demostraron que las diferencias en EUR post-antesis en cultivares de trigo se asociaron positivamente con el número de granos fijados, implicando esto una posible regulación por

tamaño de los destinos sobre la fuente. En este sentido, y considerando que el suministro de asimilados a los granos durante el llenado de los mismos proviene tanto de la fotosíntesis actual (Slafer y Rawson, 1994; Slafer y Savin, 1994; Schnyder, 1993) como de la translocación de reservas acumuladas en pre-antesis, lo cual es importante bajo condiciones de estrés hídrico (Acevedo y col., 1991; Fokar y col., 1998; Ehdaie y col., 2006b), el déficit hídrico también podría generar un efecto negativo sobre la captura de asimilados durante post-antesis afectando negativamente el rendimiento de grano.

La información sobre los valores de EUR para cultivos como maíz y trigo es abundante en la literatura pero son escasos los datos publicados para cebada (Sinclair y Machow, 1999) y menos aún para triticale (Estrada-Campuzano col, 2008; Giunta y Motzo, 2004). Por otra parte, no se dispone de estudios sobre el comportamiento comparativo entre cultivos de trigo, cebada y triticale bajo las mismas condiciones experimentales. En general, se ha reportado que las limitaciones hídricas afectan negativamente la producción de biomasa en trigo y cebada. Esto ha sido evidenciado incluso por evaluaciones mediante modelos de simulación (Semenov y col., 2009). Sin embargo, la información directa de la respuesta de los determinantes fisiológicos de la biomasa frente a una limitación hídrica es escasa (O`Connell y col., 2004; Jamieson y col., 1995). Además, hay poca información en donde se haya evaluado la sensibilidad de la producción de biomasa, IR y EUR al déficit hídrico terminal de los cultivos de trigo, cebada y triticale en un mismo ambiente. El objetivo de este capítulo es evaluar la respuesta de los determinantes fisiológicos de la producción de biomasa (IR y EUR) bajo tratamientos con y sin limitaciones hídrica durante el período de post-antesis en trigo, cebada y triticale en el sur de Chile.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los aspectos generales del experimento como su ubicación, tratamientos, manejo y análisis estadístico se detallan en el Capítulo II. En este capítulo de la tesis se hará referencia principalmente a las mediciones relacionadas con las evaluaciones de biomasa aérea, IR y EUR.

3.2.1. Mediciones

Con el objetivo de cuantificar la evolución de biomasa aérea en pre y post-antesis, se delimitaron en cada parcela 8 zonas de muestreo de 50 cm lineales cada una, además de 1 metro lineal para la cosecha. Las ocho zonas ocuparon distintas ubicaciones dentro de la parcela, pero los muestreos siguieron un orden determinado, iniciando los muestreos desde la primera hilera de la derecha hasta agotar los muestreos marcados en la misma hilera y continuar en la siguiente hilera, terminando los muestreos en la última hilera izquierda de la parcela. Los muestreos de biomasa se realizaron siguiendo la fenología del cultivo; estos se hicieron cuando más del 50% de las plantas se encontraban en los estados fenológicos de primer nudo (1N) y los siguientes en bota (Bo), antesis (At) y madurez de cosecha (MC), de acuerdo con la escala propuesta por Zadoks col. (1974). Adicionalmente, se realizaron cinco muestreos intermedios entre los estados fenológicos mencionados, un muestreo intermedio entre 1N y Bo y otros cuatro intermedios entre At y MC como se muestra en la Fig. 9.

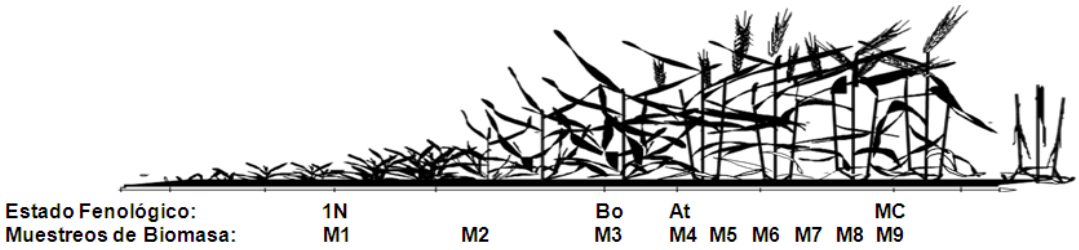

Fig. 9. Seguimiento de los muestreos de biomasa según el estado fenológico de la planta de trigo. 1N, primer nudo; Bo, bota; At, antesis; MC, madurez de cosecha. Adaptado de Slafer y Rawson (1994).

En cada muestreo se cosechó el área delimitada registrando su número de plantas. Posteriormente se eliminaron las raíces y cada planta fue separada en sus diferentes órganos, por categoría de vástago (vástago principal y macollos), en tallos más vainas, láminas, espigas y material senescido. Las muestras fueron secadas a 60º C durante 48 horas en una estufa de secado para la obtención del peso de tallos, peso de hojas y peso de espigas. Las muestras fueron pesadas en una balanza de precisión (Mettler Toledo).

Además de la cuantificación de la evolución de biomasa aérea, también se calculó el índice de área foliar (IAF) tomando una alícuota del 30% del peso fresco de hojas verdes para la medición del área foliar mediante el medidor de área foliar LI-COR (LI 3100).

Durante el ciclo de los cultivos, cuando el cielo estaba despejado, se midió dos veces por semana la intercepción de radiación por la canopia con un radiómetro lineal LI-COR (LI 3100). La radiación interceptada (IR) fue calculada a través de mediciones de radiación fotosintéticamente activa incidente y transmitida, en horas del mediodía solar durante días despejados. El radiómetro se ubicó sobre la canopia para medir radiación incidente y a nivel del suelo entre

hileras, realizando tres mediciones paralelas (derecha, centro e izquierda de la entre hilera) para minimizar el error experimental promediando éstas tres mediciones, lo que equivale a la radiación transmitida como lo describen Calderini col. (1997). La IR por la canopia se calculó como la proporción de la diferencia entre las radiaciones incidente y la transmitida. La radiación interceptada acumulada (IRa) se calculó sumando la IR diaria durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

La eficiencia en el uso de radiación (EUR) fue calculada como la pendiente de la relación entre la biomasa aérea acumulada y la intercepción de radiación acumulada, expresada en cantidad de biomasa producida por unidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (g MJ^{-1} m^{-2}). El cálculo de la EUR se realizó para el ciclo completo del cultivo y también dividido en las etapas de pre- (desde primer nudo visible hasta antesis) y post-antesis (desde antesis hasta madurez fisiológica).

2.2.5. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el análisis de varianza considerando un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones mediante el programa estadístico SAS versión 9.0. Cuando los valores de F de los análisis de varianza resultaron significativos, se procedió a realizar la comparación de medias mediante la prueba de LSD al 5% de significancia ($p<0,05$). La asociación entre las variables fue evaluada por modelos de regresión linear.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Producción de biomasa aérea y tasa de crecimiento de los cultivos

Los cultivos mostraron diferencias ($p<0,05$) en la biomasa aérea total en post-antesis y en la tasa de crecimiento del cultivo (Cuadro 5). El triticale presentó mayor producción de biomasa total en comparación con trigo y cebada. El trigo y la cebada no difirieron ($p>0,05$) significativamente entre sí en la producción de biomasa total (Fig. 10). Las diferencias de biomasa total estuvieron determinadas por la producción de biomasa post-antesis para los tres cultivos.

Cuadro 5. Biomasa aérea total, acumulada en pre y post-antesis y tasa de crecimiento de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09.

Régimen hídrico	Cultivo	Biomasa Aérea			Tasa de Crecimiento del Cultivo
		Total	pre-At	post-At	
		($g\ m^{-2}$)			
Riego	Trigo	1960.7 c†	1297.2 a	663.6 c	16.5 b
	Cebada	2178.8 bc	1134.7 ab	1044.1 bc	19.1 ab
	Triticale	2528.9 ab	1336.8 a	1192.0 ab	19.9 ab
Secano	Trigo	2193.5 bc	1256.0 ab	937.4 bc	18.4 ab
	Cebada	2235.2 abc	1253.0 ab	982.2 bc	19.6 ab
	Triticale	2665.2 a	1053.5 b	1611.7 a	21.0 a
	LSD(0.05)	436.84	230.2	484.9	3.62
			Promedios		
	Trigo	2077.1 b	1276.6 a	800.5 b	17.5 b
	Cebada	2207.0 b	1193.8 a	1013.2 b	19.4 ab
	Triticale	2597.1 a	1195.1 a	1401.9 a	20.5 a
	LSD(0.05)	311.4	164.3	346.1	2.6
	Cultivo	*	ns	*	*
	R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	C.V. (%)	10.2	10.1	24.3	10.2

†Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

El triticale presentó mayor producción de biomasa en post-antesis, sin embargo, la tasa de crecimiento durante ese período fue menor en este cultivo en comparación con trigo y cebada (Fig. 8b, cap. II). Los cultivos de trigo y cebada acumularon una cantidad similar de biomasa en post-antesis y a cosecha, lo cual reflejó una tasa de crecimiento similar (Cuadro 5).

Por otra parte, y como se indicó en el cap. II, el régimen hídrico no afectó ($p>0,05$) la cantidad de biomasa a cosecha (Cuadro 5). Tampoco se encontraron diferencias ($p>0,05$) en la tasa de crecimiento del cultivo ni en la cantidad de biomasa producida durante los períodos de pre y post-antesis. Además, no hubo interacción ($p>0,05$) significativa entre las fuentes de variación para estos caracteres (biomasa a cosecha, tasa de crecimiento del cultivo) ni para las biomasas producida en pre y post-antesis. El coeficiente de variación en biomasa a post-antesis fue relativamente alto comparado con las variables antes mencionadas (Cuadro 5).

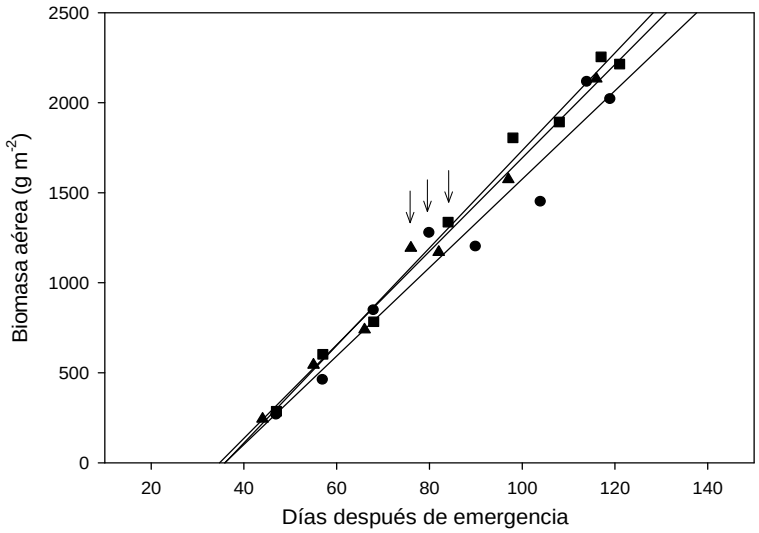

Fig. 10. Evolución de la biomasa aérea promedio en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) durante todo el ciclo de cultivo durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo.

Para analizar lo ocurrido con la producción de biomasa se evaluó la dinámica del IAF, y la capacidad del mismo para interceptar la radiación incidente y la eficiencia de conversión durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. Los resultados son presentados en las siguientes secciones.

3.3.2. Índice de área foliar e intercepción de radiación

Los cultivos mostraron diferencias significativas ($p<0,01$) en el IAF en antesis, la intercepción de radiación acumulada total y la intercepción de radiación acumulada en los períodos de pre y post-antesis. La interacción entre las fuentes de variación no fue significativa ($p>0,05$) (Cuadro 6). La dinámica del IAF durante los momentos evaluados mostró diferencias ($p<0,05$) entre los cultivos, en donde cebada destacó en comparación al resto de los cultivos durante los períodos previo y posterior a la antesis. La IRa en pre-antesis fue significativamente diferente ($p<0.001$) entre cultivos de trigo, cebada y triticale, lo que se explicaría por características de genotipo como vigor temprano, ángulo de inclinación de las hojas y estructura de la canopia, donde cebada mostró el mayor vigor comparado con el resto de los cultivos evaluados. En post-antesis la cebada logró mayor intercepción de radiación acumulada, lo cual puede explicarse por mantener por mayor tiempo valores IAF crítico o muy cercanos al crítico (Fig. 12). El mayor IAF explica la mayor IR ya que estas variables mostraron una clara asociación lineal ($r^2=0,94$, $p<0,001$).

El régimen hídrico no afectó significativamente ($p>0,05$) el IAF en antesis, la intercepción de radiación acumulada total ni la acumulada en pre y post-antesis (Cuadro 6). Sin embargo, el IAF fue significativamente menor

($p<0,05$) en el tratamiento de secano en ambos cultivos, esto para algunos momentos de post-antesis (Fig. 11).

Cuadro 6. Índice de área foliar (IAF) en antesis, intercepción de radiación acumulada total y en pre y post-antesis de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09.

Régimen hídrico	Cultivo	IAF Antesis	Intercepción de Radiación acumulada		
			Total	pre-At	post-At
		(m^2 m^{-2})	(MJ m^{-2})		
Riego	Trigo	3.1 bc	2072.2 b†	909.3 c	1162.9 b
	Cebada	5.2 a	2328.0 a	992.3 b	1335.7 a
	Triticale	4.0 ab	2232.3 ab	1105.6 a	1126.6 b
Secano	Trigo	2.2 c	1814.9 c	859.4 c	955.5 c
	Cebada	5.1 a	2194.6 ab	1005.3 b	1189.3 b
	Triticale	4.1 ab	2210.7 ab	1131.2 a	1079.5 b
	LSD(0.05)	1.5	175.1	76.25	121.7
			Promedios		
	Trigo	2.6 b	1943.5 b	884.3 c	1059.2 b
	Cebada	5.2 a	2261.3 a	998.8 b	1262.5 a
	Triticale	4.1 a	2221.5 a	1118.4 a	1103.1 b
	LSD(0.05)	1.1	125.0	54.4	86.9
	Cultivo	**	***	***	**
	R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns	ns
	C.V. (%)	20.6	4.4	4.1	5.7

† Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

El trigo mostró menor IR acumulada post-antesis en el tratamiento de secano que en el tratamiento de riego, mientras que cebada y triticale destacaron con una mayor IR acumulada post-antesis en ambos tratamientos de riego y secano (Cuadro 6). Lo anterior podría explicar las diferencias tan marcadas en la IR total entre cebada y triticale comparado con trigo, que obtuvo menores valores de intercepción de radiación acumulada al finalizar su ciclo de

crecimiento. En cebada, la mayor intercepción de radiación acumulada en post-antesis bajo riego podría deberse a las mismas causas de tener un IAF crítico por mayor tiempo, lo que permitió interceptar el 95% de radiación hasta aproximadamente el 67% del período de llenado de grano (Cuadro 6).

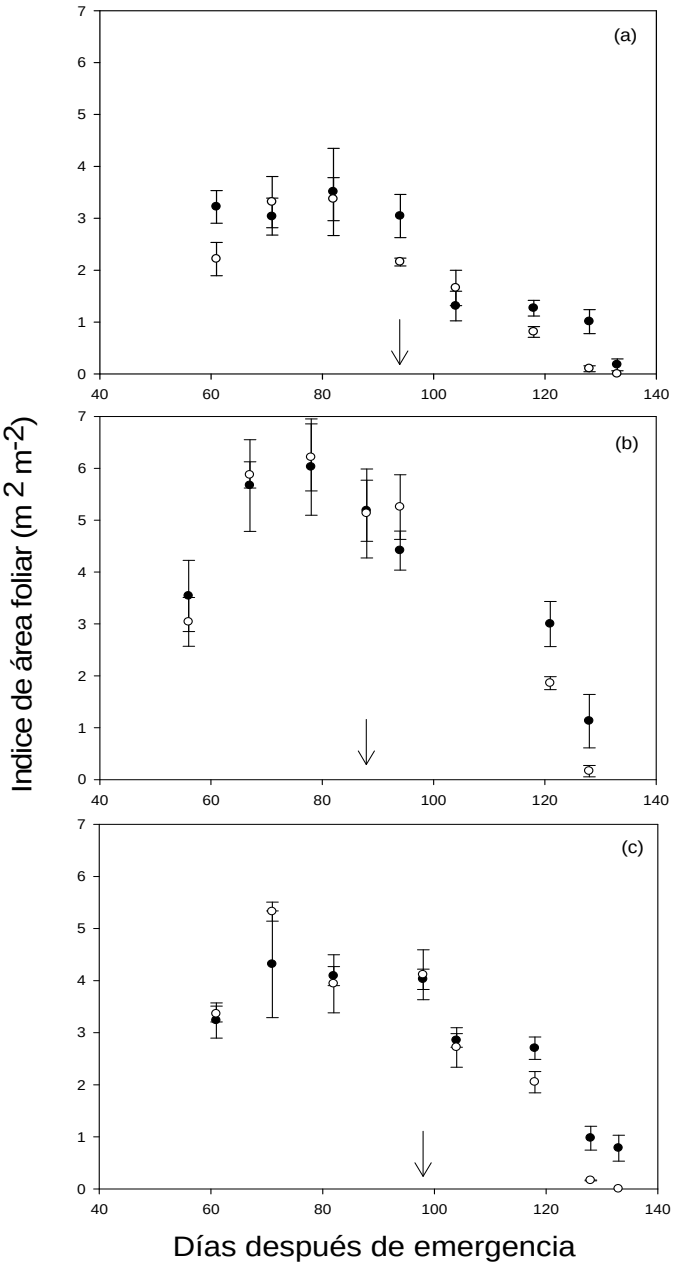

Fig. 11. Evolución del índice de aérea foliar en (a) trigo, (b) cebada y (c) triticale bajo tratamientos de riego (círculos cerrados) y secano (círculos abiertos) durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo.

En general, el mantenimiento del IAF crítico en cebada se puede interpretar como una mayor habilidad de la canopia para interceptar la radiación (Fig. 12). La Fig. 12 muestra la evolución del porcentaje de IR de cada cultivo, donde se observa que cebada interceptó un mayor porcentaje de radiación en las primeras etapas de desarrollo en comparación con trigo y triticale. La cebada y triticale lograron una mayor IR acumulada total en comparación a trigo. Por otra parte, la canopia de trigo mostró un valor máximo de IR de 90% de la radiación global incidente, mientras que el resto de cultivos alcanzaron la intercepción completa (95%).

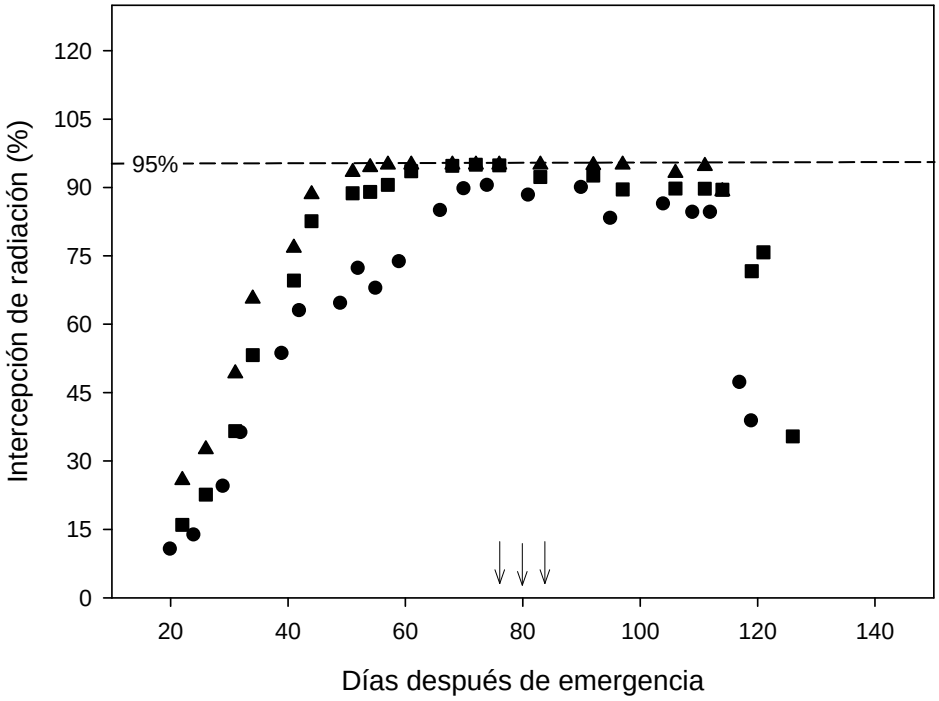

Fig. 12. Evolución del porcentaje de intercepción de radiación incidente en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados) durante la temporada 2008/09. Las flechas indican el momento de antesis de cada cultivo.

3.3.3. Eficiencia en el uso de la radiación

Los cultivos no mostraron diferencias significativas ($p>0,05$) en la EUR durante todo el ciclo de cultivo ni entre los tratamientos de riego y secano post-antesis. La interacción entre los factores de variación tampoco fue significativa ($p>0,05$) (Cuadro 7). El coeficiente de variación en EUR post-antesis fue muy alto en comparación con la EUR total y en pre-antesis. Las relaciones entre biomasa total y IR evaluadas mostraron fuertes asociaciones lineales ($r^2=0,94$; $p<0,001$) en ambos tratamientos de riego y secano para trigo, cebada y triticale.

La EUR total estuvo en un rango de 0,95 a 1,16 g MJ m^{-2} entre los cultivos evaluados. En los tres cultivos, la EUR durante el período de pre-antesis fue mayor que en post-antesis. La EUR en pre-antesis estuvo en un rango de 1,16 a 1,41 g MJ m^{-2}, mientras que en post-antesis el rango fue entre 0,83 y 1,11 g MJ m^{-2} (Cuadro 7).

El régimen hídrico no modificó significativamente ($p>0,05$) la EUR en el ciclo total de los cultivos ni en pre- y post-antesis (Cuadro 7). Las interacción entre las fuentes de variación no fueron significativas ($p>0,05$).

Cuadro 7. Eficiencia en el uso de la radiación total y en pre y post-antesis de trigo, cebada y triticale en respuesta a dos regímenes hídricos durante post-antesis evaluados en la temporada 2008/09.

Régimen hídrico	Cultivo	Eficiencia de Uso de la Radiación		
		Total	pre-At	post-At
		(g MJ m^{-2})		
Riego	Trigo	0.97 a†	1.36 a	0.89 a
	Cebada	0.95 a	1.16 b	0.92 a
	Triticale	1.16 a	1.29 a	1.10 a
Secano	Trigo	1.12 a	1.41 a	1.11 a
	Cebada	0.98 a	1.34 a	0.83 a
	Triticale	1.06 a	1.20 a	0.96 a
	LSD(0.05)	0.28	0.23	0.46
		Promedios		
	Trigo	1.04 a	1.38 a	1.00 a
	Cebada	0.96 a	1.25 a	0.87 a
	Triticale	1.11 a	1.25 a	1.03 a
	LSD(0.05)	0.20	0.18	0.32
	Cultivo	ns	ns	ns
	R.hídrico	ns	ns	ns
	Cultivo*R.hídrico	ns	ns	ns
	C.V. (%)	14.30	9.75	25.17

†Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).
*, **, *** = Significativo al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente; ns = No significativo.

3.4. DISCUSIÓN

La duración del ciclo de los cultivos, particularmente el período de post-antesis, no fue modificada por el régimen hídrico. Al respecto se ha evidenciado que la escasez de agua tiende a reducir el período de llenado de grano (Royo y col., 2000; Santiveri y col., 2002; García del Moral y col., 2005), pero bajo condiciones de estrés severo. La duración del período de pre-antesis fue de 76, 80 y 84 días en cebada, trigo y triticale, respectivamente. La duración del período de post-antesis fue mayor en triticale con 43 días, mientras que en trigo y cebada duro 39 y 38 días, respectivamente.

Los cultivos mostraron diferencias significativas ($p<0,05$) en la producción de biomasa a cosecha, de los cuales triticale tuvo mayor biomasa total y post-antesis en los tratamientos de riego y secano, siguiéndole la cebada y en último lugar trigo con menor biomasa total y en post-antesis. Esto fue positivamente asociado con el rendimiento de grano (Fig. 13). La producción de biomasa aérea pre-antesis no mostró diferencias entre cultivos ($p>0.05$), como lo muestran los promedios de cada cultivo (Cuadro 5). El trigo mostró menor producción de biomasa durante post-antesis, lo cual reflejó una menor producción de biomasa aérea total y menor tasa de crecimiento del cultivo (Cuadro 5). Por otra parte, el régimen hídrico durante el llenado no modificó la producción de biomasa aérea total ni difirió entre tratamientos de secano y riego post-antesis en los tres cultivos evaluados. Esto puede ser atribuido principalmente por la capacidad de los suelos para retener agua útil suficiente, lo que no generó situaciones de estrés hídrico de importancia para la producción de biomasa aérea (Fig. 4, Capítulo II).

El régimen hídrico modifico el IAF durante post-antesis en los tres cultivos evaluados. Resultados similares han sido reportados en trigo y cebada en condiciones con limitación hídrica (Jamieson y col., 1995). Sin embargo, la IR no fue modificada de manera significativa en ambos tratamientos de riego y secano (Cuadro 6). Lo anterior podría explicarse por la estructura de la canopia (Sadras, 1996), especialmente por el ángulo de inclinación de las hojas que afectó la distribución de la radiación interceptada. En cebada, una mayor IR acumulada bajo riego post-antesis puede ser explicada por presentar mayor IAF en antesis. En general, los cultivos mostraron menor IR en post-antesis en el tratamiento de secano, independientemente de la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos de riego y secano post-antesis (Cuadro 6). Sin embargo, dichas diferencias no se tradujeron en efectos importantes sobre la producción de biomasa.

La mayor producción de biomasa de triticale y cebada en comparación con trigo es explicada por la IR acumulada total. Sin embargo, las diferencias de biomasa entre triticale y cebada no pueden ser explicadas de manera clara por la IR. Al respecto, los datos obtenidos sobre las mediciones directas de IR por la canopia de triticale y cebada durante el término de post-antesis, ofrecen poca información útil sobre la cantidad de radiación que puede ser efectivamente utilizado, debido a posibles inclusiones de radiación interceptada por los tejidos muertos de hojas. La producción de biomasa pre-antesis no difirió entre los cultivos (Fig. 13), mientras que IR acumulada en pre-antesis fue diferente entre cultivos, lo cual puede ser explicado por características del genotipo como vigor temprano en plántulas y la capacidad de generar macollos (Turner y Nicolás, 1998; Richards y Lukács, 2002), donde cebada y triticale lograron mayor IR

acumulada que trigo (Cuadro 6). Sin embargo, la diferencia en el número de macollos en cebada (1858 m^2) fue mucho mayor que triticale (461 m^2), lo cual hace pensar que el vigor temprano pudo ser el factor que determino mayor IR acumulada en cebada durante pre-antesis. Esta particularidad en cebada ha sido reportada en otros trabajos bajo climas mediterráneos (Gregory y col., 1992; López-Castañeda y Richards, 1994). La IR en el período de post-antesis fue mayor comparado con pre-antesis en los tres cultivos evaluados bajo tratamiento de riego y secano.

La EUR no difirió significativamente entre los cultivos evaluados durante todo el ciclo de crecimiento, ni durante pre y post-antesis. Esta particularidad en cereales ha sido reportada en otros estudios donde se evaluaron cultivares de trigo y cebada (Muurinen y Peltonen-Sainio, 2006). La EUR en los tres cultivos fue mayor en el período de pre-antesis comparado con el período de post-antesis (Cuadro 7). Lo anterior podría ser explicado por intercambio de gases en la canopia debido a una disminución en la actividad fotosintética bruta y un aumento en la respiración de la canopia (Biscoe y col., (1975a) o por el efecto del déficit de presión de vapor que es mayor en post-antesis (Kemanian y col., 2004). Al respecto, también se ha registrado que al final de la temporada de los cultivos bajo estrés, como el estrés hídrico y las altas temperaturas pueden aumentar la respiración y reducir la fotosíntesis y la EUR (Goyne y col., 1993). Sin embargo, en el presente estudio no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de riego y secano en los tres cultivos evaluados. La EUR en pre-antesis no permite explicar de manera clara las similitudes en la producción de biomasa pre-antesis en los tres cultivos evaluados a pesar de mostrar distinta IR pre-antesis. Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten concluir

que el déficit hídrico moderado no modificó la producción de biomasa aérea, la IR ni la EUR. Las comparaciones entre cultivos mostraron diferencias significativas en la producción de biomasa aérea post-antesis y total, así como en la intercepción de radiación, mientras que la EUR en pre-antesis, post-antesis y total no mostró diferencias significativas. Las mayor biomasa post-antesis de triticale y cebada comparado con trigo podría atribuirse por mayor IR acumulada total.

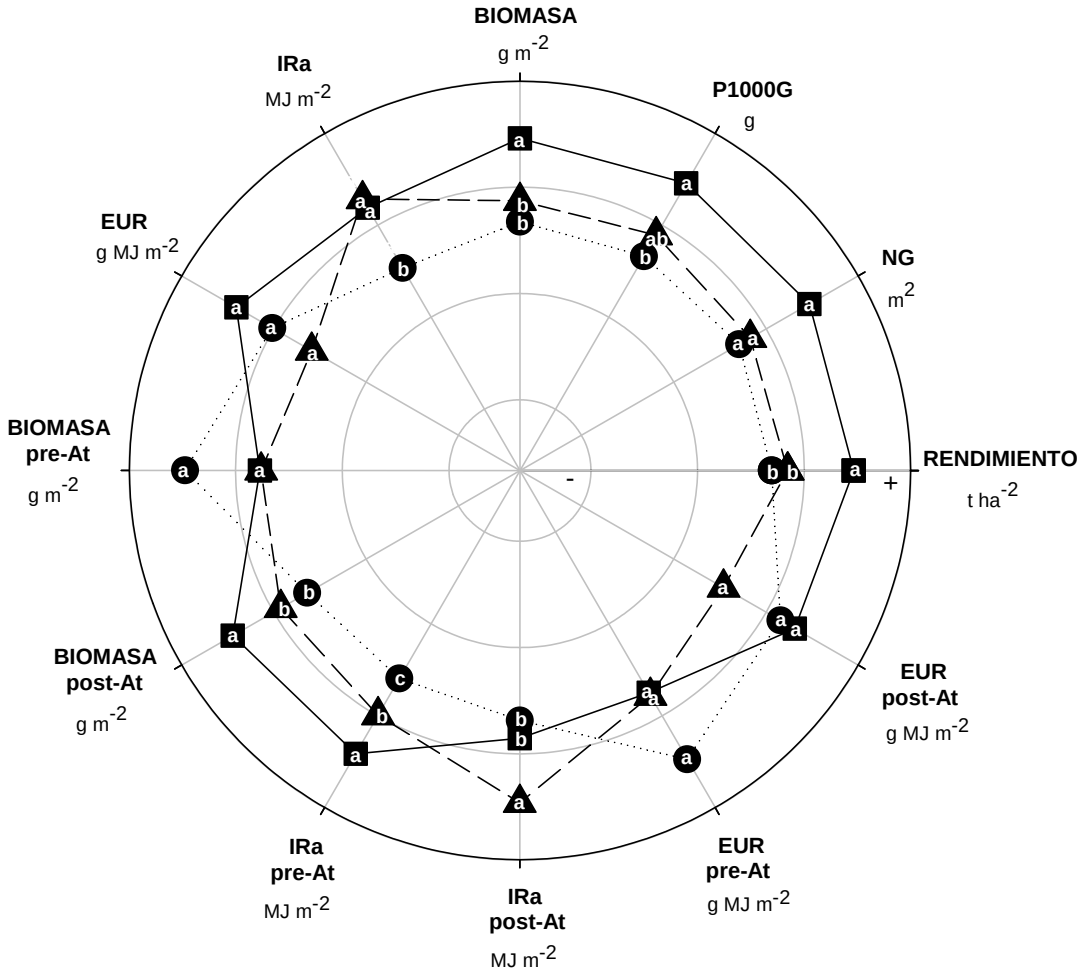

Fig. 13. Promedios estandarizados del rendimiento, número de granos (NG), peso de 1000 granos (P1000G), producción de biomasa aérea, intercepción de radiación acumulada (IRa) y eficiencia de uso de la radiación (EUR) total y durante pre y post-antesis en trigo (círculos), cebada (triángulos) y triticale (cuadrados). Promedios estandarizados con la misma letra dentro de cada círculo, triángulo y cuadrado en una misma variable no difieren significativamente entre sí (DMS 0.05).

3.5. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo. E., Craufurd, P.Q., Austin. R.B., Perez-Marco, P., 1991. Trait associated with high yield in barley in low-rainfall environments. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 116, 23.36.

Biscoe, P.V., Scott, R.K., Monteith, J.L., 1975a. Barley and its environment III. Carbon budget of the stand. Journal of Applied Ecology. 12, 269–293.

Calderini, D.F., Dreccer, M.F., Slafer, G.A., 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. Field Crops Research. 3, 271–281.

Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. Field Crops Research. 112, 205–213.

Earl, H., Davis, R., 2003. Effect of Drought Stress on Leaf and Whole Canopy Radiation Use Efficiency and Yield of Maize. Agronomy Journal. 95, 688-696.

Ehdaie, B., Alloush, G.A., Madore, M.A., Waines, J.G., 2006b. Genotypic Variation for Stem Reserves and Mobilization in Wheat: II. Postanthesis Changes in Internode Water-Soluble carbohydrates. Crop Science. 46, 2093–2103.

Estrada-Campuzano, G., Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2008. Genotypic variability and response to water stress of pre and post anthesis phases in triticale. European Journal of Agronomy. 28, 171–177.

Fokar, M., Blum, A. y Nguyen, H. T. 1998. Heat tolerance in spring wheat. II. Grain filling. Euphytica 104, 9–15.

Garcia del Moral, L.F., Rharrabti, Y., Elhani, S., Martos, V., Royo, C., 2005. Yield formation in Mediterranen durum wheats under two contrasting water regimes based on path-coefficient analysis. Euphytica. 146, 203–212.

Goyne, P.J., Milroy, S.P., Lilley, J.M., Hare, J.M., 1993. Radiation interception, radiation-use efficiency and growth of barley cultivars. Australian Journal of Agricultural Research. 44, 1351–1366.

Gregory, P.J., Tennant, D., Belford, R.K., 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. Australian Journal of Agricultural Research. 43, 555-573.

Hall, A., Connor, D., Sadras, V., 1995. Radiation use efficiency of sunflower crops: effects of specific leaf nitrogen and ontogeny. Field Crops Research. 41, 65-77.

Jamieson, P.D., Martin, R.J., Francis, G.S., Wilson, D.R., 1995. Drought effect on biomass production and radiation-use efficiency in barley. Field Crops Research. 43, 77–86.

Kemanian, A.R., Stockle, C.O., Huggins, D.R., 2004. Variability of barley radiation use efficiency. Crop Science. 44, 1662–1672.

Lecoeur, J., Ney, B., 2003. Change with time in potential radiation-use efficiency in field pea. European Journal of Agronomy. 19, 91-105.

López-Castañeda C., Richards R.A., 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristic. Field Crops Research. 37, 51-62.

Semenov, M.A., Martre, P., Jamieson, P.D., 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. Agricultural and Forest Meteorology. 149, 1095–1104.

Miralles, D.J**.,** Slafer, G.A., 1997. Radiation interception and radiation use efficiency of near-isogenic wheat lines with different height. Euphytica, 97, 201-208.

Motzo, R., Giunta, F., 2002. Awnedness affects grain yield and kernel weight of near-isogenic lines of durum wheat. Australian Journal of Agricultural Research. 53, 1285–1293.

Muurinen, S., Peltonen-Sainio P., 2006. Radiation-use efficiency of modern and old spring cereal cultivars and its response to nitrogen in northern growing conditions. Field Crops Research. 96, 363–373.

O´Connell, M., O`Leary, G., Whitfield, D., Connor, D., 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. Field Crops Research. 85, 111-124.

Plénet, D., Mollier, M., Pellerin, S., 2000b. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. Plant and Soil. 224, 259–272.

Rebetzke, G.J., Richards, R.A., 1999. Genetic improvement of early vigour in wheat. Australian Journal of Agricultural Research 50, 291-301.

Richards, R.A., Lukacs, Z., 2002. Seedling vigour in wheat – sources of variation for genetic and agronomic improvement. Australian Journal of Agricultural Research. 53, 41-50.

Royo, C., Abaza, M., Blanco, R., García del Moral, L.F., 2000. Triticale grain growth and morphometry as affected by drought stress, late sowing and simulated drought stress. Australian Journal of Plant Physiology. 27, 1051–1059.

Sadras, V.O., 1996. Cotton responses to simulated insect damage: radiation-use efficiency, canopy architecture and leaf nitrogen content as affected by loss of reproductive organs. Field Crops Research. 48, 199–208.

Santivieri, F., Royo, C., Romagosa, I., 2002 Patterns od grain filling of spring and witner hexaploid triticales. European Journal of Agronomy. 16, 219-230.

Schnyder, H., 1993. The role of carbohydrate storage and redistribution in the source-sink relations of wheat and barley during grain filling-a review. New Phytologist. 123, 233-245.

Sinclair, T.R., Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. Advances in Agronomy. 65, 215– 266.

Slafer, G.A., Savin, R., 1994. Source-sink relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. Field Crops Research. 37, 39-49.

Slafer, G.A., Rawson, H., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. Australian Journal of Plant Physiology. 21, 393–426.

Tesfaye, K., Walker, S., Tsubo, M., 2006. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. European Journal of Agronomy. 25, 60-70.

Thorne, G.N., Pearman, I., Day, W., Todd, A.D., 1988. Estimation of radiation interception by winter wheat from measurements of leaf area. . Journal of Agricultural Science, Cambridge. 110, 101–108.

Turner, N.C., Nicolas, M.E., 1998. Early vigour: a yield positive characteristic for wheat in drought-prone Mediterranean-type environments. pp. 47-62. *In*: R. K. Behl, D. P. Singh y G. P. Lodhi (eds.). Crop improvement for stress tolerance. CCS Haryana Agricultural University, Hisar- Max Mueller Bhawan. New Delhi, India.

Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research. 14: 415–421.

4. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión general

Los rendimientos de grano en trigo, cebada y triticale fueron asociados con el componente número de granos por m^2 y no con el peso de grano (peso de 1000 granos), independientemente del régimen hídrico. Lo anterior reafirma lo reportado en la literatura, cuando se evaluaron estos en ambientes mediterráneos (Cossani y col., 2009). El rendimiento de grano en los cultivos evaluados fue correlacionado con una mayor producción de biomasa y altura de planta a cosecha, donde una mayor altura significó mayor biomasa aérea y altos rendimientos (Fig. 6). El IC mostró diferencias no significativas entre cultivos, éstos valores están en acuerdo con los datos reportados en experimentos donde evaluaron cultivares de trigo modernos (Sayre y col., 1997; Calderini y col., 1999b; Brancourt-Hulmel y col., 2003; Shearman y col., 2005).

La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos de riego y secano post-antesis sobre el rendimiento de grano en los tres cultivos evaluados no permitió concluir cuál de ellos posee características de mejor adaptación ante déficit hídrico terminal, lo cual permite rechazar la hipótesis (1). Más allá de la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos de riego y secano post-antesis, es evidente que en la zona posibles limitaciones hídricas en el futuro mediato podrían afectar el peso de grano en cereales, según los datos presentados en esta tesis (Cuadro 3), en donde se muestra que peso de 1000 granos fue menor en tratamiento de secano post-antesis comparado con el tratamiento de riego post-antesis en los tres cultivos evaluados. Lo anterior permite afirmar que los efectos de cambio climático podrían afectar de manera leve los rendimientos actuales por exposición de los cultivos a períodos más

prolongados con ausencia de lluvias durante el llenado de grano en el sur de Chile (IPCC, 2001a). Los rendimientos de grano en trigo, cebada y triticale fueron asociados con el componente número de granos por m^2 y no con el peso de grano (peso de 1000 granos), independientemente del régimen hídrico. Lo anterior permite rechazar la hipótesis (2), por lo menos para las condiciones mostradas en éste año de evaluación.

Las diferencias en la producción de biomasa en triticale y cebada comparada con trigo son explicadas por la IR acumulada total. La IR en período de post-antesis fue mayor comparado con período de pre-antesis en los tres cultivos evaluados bajo tratamiento de riego y secano post-antesis. En general, cebada mostró mayor IR acumulada en post-antesis, lo cual puede ser explicado por una mayor duración IAF crítico que permitió interceptar el 95% de la radiación en un período más prolongado que trigo y triticale (Fig. 12). La EUR no difirió significativamente entre los cultivos evaluados. Esta particularidad en cereales ha sido reportada en otros estudios donde se evaluaron cultivares de trigo y cebada (Muurinen y Peltonen-Sainio, 2006). La EUR en los tres cultivos fue mayor en el período de pre-antesis comparado con el período de post-antesis (Cuadro 7). Lo anterior podría ser explicado por intercambio de gases en la canopia debido a una disminución en la actividad fotosintética bruta y un aumento en la respiración de la canopia (Biscoe y col., (1975a). Sin embargo, en el presente estudio no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de riego y secano en los tres cultivos evaluados. Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten concluir que el déficit hídrico moderado no modificó la producción de biomasa aérea, la IR ni la EUR, por lo que se rechaza la hipótesis (3) planteada en esta tesis.

4.2. Conclusiones

1.- La disminución de la disponibilidad hídrica en período de llenado de grano no modificó el rendimiento ni sus componentes numéricos (número de grano y peso de grano) en los cultivos evaluados.

2.- Se observó una respuesta diferencial entre cultivos en el rendimiento y peso de grano, así como en la producción de biomasa y la intercepción de radiación, sin cambios en la eficiencia del uso de la radiación en los tres cultivos.

3.- El número de granos por m^2 explicó en mayor medida el rendimiento de grano en los tres cultivos evaluados bajo ambos tratamientos de riego y secano post-antesis.

4.- El rendimiento de grano fue asociada positivamente con la producción de biomasa total en los tres cultivos evaluados.

5.- La mayor producción de biomasa a cosecha de triticale y cebada en comparación con trigo es explicada por la IR acumulada total. Sin embargo, la IR acumulada total no permite explicar de manera clara las diferencias en el rendimiento de grano entre triticale y cebada.

6.- La eficiencia del uso de la radiación no permiten explicar los mayores rendimientos de grano de triticale encontrados en este estudio.