

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA EN COEFICIENTES GENÉTICOS DE  
TRIGO CANDEAL (*Triticum turgidum* L. ssp. durum)**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS MENCIÓN PRODUCCIÓN DE CULTIVOS

MARCO ISAAC GARRIDO SALINAS

DIRECTORES DE TESIS  
GIORGIO CASTELLARO GALDAMES  
PAOLA SILVA CANDIA

PROFESORES CONSEJEROS  
EDMUNDO ACEVEDO HINOJOSA  
VICTOR GARCIA DE CORTAZAR GARCIA DE CORTAZAR

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO, 2012

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE POSTGRADO

Titulo

**EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA EN COEFICIENTES GENÉTICOS DE TRIGO  
CANDEAL (*Triticum turgidum* L. ssp. durum)**

Tesis para optar al grado de magister en ciencias agropecuarias mención producción de cultivos

Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo

**Marco Isaac Garrido Salinas**

	Calificación (Memoria de titulo)	Calificación (Tesis de grado)
<b>Directores de Tesis</b>		
Giorgio Castellaro G., Ing. Agr. M. S.	7,0	A
Paola Silva C., Ing. Agr. M.S. Dr.	7,0	A
<b>Profesores Consejeros</b>		
Edmundo Acevedo H., Ing. Agr. M.S. Ph. D.	6,5	A
Víctor García De Cortázar G. de C., Ing. Agr. M.S. Dr.	7,0	A

Santiago, Chile  
2012

*"Never let your sense of morals prevent you from doing what is right".*

Salvor Hardin

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar con quienes mi agradecimiento es solo superado por amor, y sin quienes seguro no hubiese logrado esta gran meta. A mi madre Patricia Salinas, profesora que admiro profundamente y madre que entregó su amor de manera incondicional, quien en los momentos más difíciles se sacrificó, logrando sobreponerse por nosotros. A mi tita Clemira Osses, por su gran cariño, paciencia, y presencia constante, sin usted todo hubiese sido más difícil. A Juan José, mi hermano, quien resultó ser un gran apoyo, inspirándome constantemente con su joven fortaleza, gracias y seguro lograrás todas tus metas. A mi hermanita Tania, porque independiente de todo siempre fue capaz de alegrarme con su sonrisa y lindos ojos. Hermanos los adoro y sepan que motivan todos mis esfuerzos.

Quisiera agradecer a Paola Silva, mi profesora y guía, quien ha sido fundamental en mi formación y me ha entregado incondicionalmente las herramientas necesarias para cumplir mis metas. Al Profesor Edmundo Acevedo, fuerte y admirable, quien siempre mostró interés ante mis dudas, me aconsejó oportuna y felizmente, y junto a Paola me acogió en su grupo de trabajo. Por eso y muchas otras cosas gracias. Al Profesor Giorgio Castellaro por apoyarme a lo largo de realización del presente trabajo y aceptar ser mi profesor guía sin prejuicios. A Don Víctor García de Cortázar a quien admiro y tuve la suerte de que formara parte del equipo evaluador. A Nicolás Zamorano, un gran amigo, crítico y constructivo.

Sería impensable olvidar a quienes además de compañeros de trabajo, se convirtieron en grandes amigos, gracias a Rosa Peralta por su ayuda constante, ser una sincera consejera y por colaborar en mi formación de forma cariñosa o severa, dependiendo de qué era lo prudente en ese momento, a Carolina González, Nicolás Gomara, Pablo Cortés, Victoria Figueroa, Álvaro Aillapan y Romina Vera, quienes participaron alegremente en la realización de mi tesis: También agradezco a quienes si bien llegaron más tarde, han sido parte importante de este proceso, Carla Soto, Ignacio Guajardo, Javier Hernández, Gerlitt González y Marcela Opazo, gracias.

# ÍNDICE

CAPÍTULO I .....	8
I. Revisión bibliográfica .....	8
1. Trigo candeal en Chile .....	8
2. Fenología del cultivo .....	9
3. Crecimiento, estructura de la canopia e interceptación de radiación .....	10
4. Modelos de simulación de cultivos y coeficientes genéticos .....	12
5. Referencias Bibliográficas .....	14
CAPÍTULO II .....	18
II. Efecto de la fecha de siembra sobre coeficientes genéticos de trigo candeal ( <i>Triticum turgidum</i> L. ssp. durum) relativos a desarrollo .....	18
1. Resumen .....	18
2. Abstract .....	19
3. Introducción .....	20
4. Hipótesis .....	21
5. Objetivos .....	21
5.1. Objetivo general .....	21
5.2. Objetivos específicos .....	21
6. Materiales y Métodos .....	22
6.1. Ubicación del experimento y condición edafoclimática .....	22
6.2. Diseño del experimento y labores culturales .....	22
6.3. Mediciones .....	24
6.3.1. Seguimiento del estado de desarrollo del cultivo .....	24
6.3.2. Número de hojas en el tallo principal .....	24
6.4. Estimaciones .....	24
6.4.1. Cuantificación del desarrollo del cultivo en base a tiempo térmico .....	24
6.4.2. Tasa de aparición foliar .....	25
6.5. Información meteorológica .....	25
6.6. Análisis estadístico .....	26
7. Resultados y Discusión .....	28
7.1. Temperatura del aire y duración de las fases fenológicas .....	28
7.2. Tasa de aparición foliar .....	31
7.3. Filocrono .....	33
8. Conclusiones .....	36
9. Referencias Bibliográficas .....	37
10. Anexos .....	40
10.1. Productos fitosanitarios, fecha y dosis de aplicación .....	40
10.2. Análisis de varianza de sumas térmicas .....	40
10.3. Valores medidos de sumas térmicas y número de hojas en ambas fechas de siembra y variedades. 41	
10.4. Análisis de regresión lineal: Relación entre Número de hojas en el tallo principal y suma térmica. 41	

10.6.	Análisis de regresión lineal: Relación entre Suma térmica y Número de hojas en el tallo principal.	43
10.7.	Test de paralelismo para los coeficientes de filocrono de cada tratamiento .....	44
CAPÍTULO III .....		45
III.	Efecto de la fecha de siembra sobre coeficientes genéticos de trigo candeal ( <i>Triticum turgidum</i> L. ssp. durum) relativos a crecimiento .....	45
1.	Resumen.....	45
2.	Abstract.....	46
3.	Introducción.....	47
4.	Hipótesis .....	49
5.	Objetivos .....	49
5.1.	Objetivo general .....	49
5.2.	Objetivos específicos.....	49
6.	Materiales y Métodos .....	50
6.1.	Ubicación del experimento y condición edafoclimática .....	50
6.2.	Diseño del experimento y labores culturales .....	50
6.3.	Mediciones .....	52
6.3.1.	Seguimiento del estado de desarrollo del cultivo.....	52
6.3.2.	Establecimiento del cultivo .....	52
6.3.3.	Fitomasa aérea.....	52
6.3.3.1.	Índice de Área Foliar .....	52
6.3.3.2.	Número de hojas en el tallo principal .....	53
6.3.3.3.	Acumulación de materia seca .....	53
6.3.4.	Intercepción de radiación.....	53
6.3.5.	Incremento del índice de cosecha .....	54
6.3.6.	Rendimiento.....	54
6.4.	Estimaciones .....	54
6.4.1.	Suma térmica.....	54
6.4.2.	Área foliar máxima por planta .....	55
6.4.3.	Coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa .....	55
6.4.4.	Radiación fotosintéticamente activa interceptada.....	56
6.4.5.	Eficiencia de uso de la radiación PAR interceptada en la producción de materia seca.....	56
6.4.6.	Tasa relativa de incremento del índice de cosecha .....	57
6.5.	Información meteorológica .....	57
6.6.	Análisis estadístico.....	57
7.	Resultados y Discusión .....	59
7.1.	Coeficientes asociados a la canopia del cultivo .....	59
7.1.1.	Evolución del Índice de Área Foliar .....	59
7.1.2.	Intercepción de radiación fotosintéticamente activa y Eficiencia de uso de la PAR interceptada .....	61
7.2.	Crecimiento del área foliar y área foliar máxima por planta.....	66
7.3.	Tasa relativa de incremento del índice de cosecha.....	67
8.	Conclusiones.....	70
9.	Referencias Bibliográficas.....	71
10.	Anexos.....	75

10.1.	Fitosanitarios aplicados al cultivo.....	75
10.2.	Índice de área foliar medidos para ambas variedades en ambas fechas de siembra.....	75
10.3.	Estimación de parámetros de regresión de la relación entre el IAF y suma térmica.....	75
10.3.1.	F1LL.....	75
10.3.2.	F1CC.....	76
10.3.3.	F2LL.....	76
10.3.4.	F2CC.....	77
10.4.	Promedios diarios de la fracción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada para ambas variedades y fechas de siembra.....	77
10.5.	Estimación del coeficiente de extinción de PAR a partir de la relación entre la fracción de PAR interceptada y el índice de área foliar.....	78
10.5.1.	F1LL.....	78
10.5.2.	F1CC.....	79
10.5.3.	F2LL.....	79
10.5.4.	F2CC.....	79
10.6.	Test de paralelismo para el coeficiente de extinción PAR ( $k$ ) en cada tratamiento.....	80
10.7.	Promedios de materia seca medida para ambas variedades y fechas de siembra.....	80
10.8.	Promedios de radiación fotosintéticamente activa interceptada estimada para ambas variedades y fechas de siembra.....	81
10.9.	Estimación de la eficiencia de uso de la radiación (RUE) a partir de la relación entre la materia seca producida y la radiación fotosintéticamente activa interceptada.....	81
10.11.	Estimación de parámetros de regresión de la relación entre el área foliar por planta (AFP) y el número de hojas del tallo principal (NHTP).....	83
10.11.1.	F1LL.....	83
10.11.2.	F1CC.....	84
10.11.3.	F2LL.....	84
10.11.4.	F2CC.....	84
10.12.	Índice de cosecha medido para cada variedad y fecha de siembra.....	85
10.13.	Estimación de la Tasa relativa de incremento del índice de cosecha a partir de la relación entre el índice de cosecha y la edad fenológica del cultivo.....	85
10.13.1.	F1LL.....	85
10.13.2.	F1CC.....	86
10.13.3.	F2LL.....	86
10.13.4.	F2CC.....	86
10.14.	Test de paralelismo para tasa de incremento del índice de cosecha para cada tratamiento.....	87
10.15.	Promedios del Rendimiento, biomasa, índice de cosecha y componentes de rendimiento en términos de materia seca.....	87

## CAPÍTULO I

### I. Revisión bibliográfica

#### 1. Trigo candeal en Chile

En Chile, el trigo candeal se produce en la zona central y centro sur con clima mediterráneo, concentrándose el 90% de la producción en áreas regadas con rendimientos medios de 5100 Kg ha<sup>-1</sup>, cubriendo solo el 50% de la demanda nacional (Silva *et al.*, 2007). El país produce alrededor de 79.000 toneladas de trigo candeal con 15.500 hectáreas, e importa cerca de 85.000 toneladas para poder suplir el consumo interno (Fundación Chile, 2008). Su producción se ha desplazado hacia el sur dado el aumento del valor de las tierras en la zona centro y centro norte del país por la expansión de la actividad frutícola de exportación, no obstante también se ha visto estimulada por la factibilidad técnica de producir altos rendimiento y buena calidad en la Región del Bio-Bío. De hecho, hacia el año 1997 la producción se distribuía entre las Regiones de Coquimbo y la del Maule, mientras que en la actualidad se cultiva desde la Región de Coquimbo hasta la Región de la Araucanía, concentrándose en la zona centro sur del país.

INIA ha liberado variedades de su programa de mejoramiento genético desde el año 1956, al cual desde 1988 se unió al sector privado para enfocar el mejoramiento a los requerimientos de procesamiento industrial, siendo las últimas variedades liberadas Llaretta y Guayacán INIA el año 1997 y Corcolén INIA el 2002. El mejoramiento genético de estas variedades se ha desarrollado básicamente bajo condiciones de riego, siendo la más cultivada Llaretta INIA, cubriendo un 90% de la superficie nacional (Matus *et al.*, 2005; Jobet, 2007).

Las variedades recomendadas actualmente por INIA, Llaretta y Corcolén son de hábito primaveral, por lo que no requieren temperaturas vernalizantes para inducir la transformación del ápice vegetativo a reproductivo, tienen una altura de entre 83-95 cm, cañas resistentes a tendedura y poseen un potencial de rendimiento por sobre los 70 qq ha<sup>-1</sup> (Jobet, 2007).

## 2. Fenología del cultivo

Durante el ciclo del cultivo se producen cambios en términos morfológicos externos de la planta y en la actividad del ápice meristemático, distinguiendo un desarrollo fásico, asociado a un cambio en la actividad del ápice y el balance de carbono en la planta, y un desarrollo morfológico que se refiere al inicio y fin del crecimiento de un órgano.

El desarrollo fásico del trigo se sucede entre germinación, crecimiento de la plántula, macollaje, elongación del tallo, estado de bota, emergencia de la espiga, anthesis, desarrollo lechoso del grano, desarrollo pastoso del grano y madurez fisiológica (Zadoks *et al.*, 1974). La ocurrencia de cada etapa fenológica puede ser simulada en base funciones tradicionales lineales de sumas térmicas (ST, °C día), tal como la de Candolle (1855) (Ecuación 1), definida como la sumatoria de la diferencia entre la temperatura media del aire sobre una temperatura base de desarrollo, a partir de la cual el cultivo acelera su tasa desarrollo.

$$ST = \sum_{i=t_i}^{t_f} (TMD_i - T_b) \quad [1]$$

Donde  $ST$  es la suma térmica (°C d) desde el inicio de una etapa fenológica ( $i$ ) hasta su fin ( $f$ ),  $TMD$  es la temperatura media (°C) y  $T_b$  es la temperatura base de desarrollo del cultivo (°C).

El desarrollo puede ser acelerado por estrés hídrico, lo cual es atribuido a que bajo estas condiciones el cultivo alcanza una temperatura mayor que la del aire (Acevedo *et al.*, 2002; Stockle *et al.*, 2003). En términos generales, cualquier situación que modifique el balance energético a nivel del cultivo, aumentando la temperatura, o estresando a la planta y generando un cierre estomático, tenderá a acelerar la suma térmica.

Al realizar la simulación de la fenología de un cultivo, en particular sobre localidades contrastantes o diferentes fechas de siembra, muchas veces el tiempo térmico no es un buen predictor del desarrollo, dado que en este proceso interactúan fenómenos

como la vernalización y el fotoperiodo (Ritchie *et al.*, 1998). En particular, las variedades chilenas de trigo candeal son de hábito de crecimiento primaveral, por lo que no requieren temperaturas vernalizantes y están descritas como insensibles al fotoperiodo, por lo que en condiciones no estresantes, el tiempo térmico requerido para completar cada etapa fenológica o morfológica debiera ser invariable.

### **3. Crecimiento, estructura de la canopia e interceptación de radiación**

El crecimiento de un cultivo depende de la habilidad de este para capturar radiación y de la eficiencia con que convierte esa radiación interceptada en biomasa. En particular, la producción de materia seca por parte de un cultivo puede ser expresada como producto de tres términos: i) la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR) por unidad de superficie ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), ii) la proporción de PAR interceptada por el cultivo, y iii) la producción de materia seca por unidad de PAR interceptada (Eficiencia del uso de la radiación,  $\text{g MJ}^{-1}$ ). Estos tres términos constituyen un método de análisis del crecimiento (Monteith, 1994) y han sido fundamentales en el desarrollo de modelos simples de crecimiento de cultivos.

La radiación que intercepta un cultivo es función de la estructura de la canopia, en términos de índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción de radiación ( $k$ ). Watson introdujo en 1947, el concepto de índice de área foliar, definiéndolo como el área de las hojas de una población de plantas dividida por el área de terreno que estas ocupan. Como ambas áreas están en las mismas unidades es adimensional. No obstante, conviene recordar que se trata del cociente de  $\text{m}^2$  (hojas) /  $\text{m}^2$  (terreno). El concepto del IAF tiene una serie de aplicaciones prácticas. La modificación del IAF como consecuencia del uso de diferentes densidades de siembra o arreglos espaciales es, quizás, el caso más obvio. En el caso de las plantas sometidas a raleos o podas, resulta evidente que estas prácticas modifican su IAF. En general, la mayor productividad de los cultivos está asociada con un IAF que permita una interceptación del PAR incidente por encima del 95%, el cual es comúnmente llamado índice de área foliar crítico. Por lo tanto, gran parte del éxito que puede obtenerse en la producción vegetal, dependerá de la aplicación de prácticas agronómicas que permitan alcanzar esta cobertura o interceptación amplia en el menor tiempo posible.

El coeficiente de extinción de radiación ( $k$ ) se origina de la adaptación realizada por Monsi y Saeki (1953) a partir de la Ley de Beer Lambert, el cual en cultivos extensivos, cuyas hojas están distribuidas de forma aleatoria, depende principalmente del ángulo de elevación del sol y de la distribución de ángulos foliares (Villalobos *et al.*, 2002). La ley establece la relación entre la fracción de radiación interceptada por la canopia del cultivo, y el IAF, y en términos simples representa la atenuación exponencial de la radiación a medida que aumenta el IAF. El coeficiente de extinción tiende a ser menor en monocotiledóneas, por lo tanto la arquitectura de estas plantas tiende a ser más erectas que las dicotiledóneas.

La radiación fotosintéticamente activa interceptada tiene una relación lineal tanto con la biomasa producida por el cultivo y la tasa de crecimiento, evidenciado por diversos autores (Del Pozo, 1988; Takahashi y Nakaseco, 1990; Takahashi y Nakaseco, 1993; Calderini *et al.*, 1997; Kemanian *et al.*, 2004; O'Connell, 2004; Albrizio y Steduto, 2005). La pendiente de esta relación lineal es la eficiencia del uso de la radiación (RUE) el cual representa la generación de materia seca por unidad de energía captada, sea esta interceptada o absorbida por el cultivo. Este coeficiente es ampliamente utilizado para describir y estudiar el crecimiento de los cultivos, basado en el principio de que el crecimiento es un proceso de transformación de energía radiante en energía química (Hay y Walker, 1989).

En términos de modelamiento, la RUE es un coeficiente genético, que en condiciones potenciales es específica para cada especie y variedades de una misma especie, y su magnitud tiende a mantenerse constante en función del medio ambiente (Gifford *et al.*, 1984). Además tiende a mantenerse constante durante la estación de crecimiento lo que se explica bajo los supuestos de una proporcionalidad entre respiración y fotosíntesis, una respuesta lineal de la fotosíntesis a la intercepción de radiación a nivel de canopia y que no se den cambios sustanciales en la composición bioquímica de la biomasa producida (Charles-Edwards, 1982 citado por Albrizio y Steduto, 2005)

No obstante, a medida que nos alejamos de las condiciones potenciales. RUE tiende a mostrar alta variabilidad, por lo que Stockle *et al.*, (2003) indica que es importante seleccionar valores a partir de experimentos con cultivos libres de estrés y desarrollados en medio ambientes con bajos niveles de déficit de presión de vapor

(dpv). De hecho en condiciones no limitantes de agua y nutrientes, la RUE tiende a mantenerse constante durante la estación de crecimiento para una especie y medio ambiente dado (Hsiao, 1993, citado por Albrizio y Steduto, 2005).

#### **4. Modelos de simulación de cultivos y coeficientes genéticos**

Un modelo es una representación simplificada de un objeto o sistema (Forrester, 1972). Los sistemas agrícolas, son inherentemente biológicos, jerárquicos, los cuales poseen múltiples niveles de organización (Thornley y Jonson, 1990), por lo tanto en términos generales, su representación es compleja.

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados como mecanicistas y empíricos. Según Charles-Edwards y Thronley (1974), los modelos mecanicistas buscan representar una realidad dividiéndola e intentando comprender su funcionamiento en base de sus componentes e interacciones. Suelen estar compuestos por un número sustantivo de ecuaciones y parámetros, lo que genera la desventaja de ser en lo general muy complejos y de requerir numerosas estimaciones. Por otro lado, los modelos empíricos son aquellos construidos a partir de observaciones de un sistema real, y a partir de estas, generar ecuaciones que representen los datos experimentales. Si bien este tipo de modelos resultan ser más fáciles de construir que los mecanicistas, tienen la desventaja de presentar una gran dependencia de las condiciones medio ambientales en las que sus ecuaciones empíricas fueron desarrolladas.

En agronomía, la investigación de los diferentes procesos climáticos y de cultivos que interactúan en la generación de rendimiento a través de experimentación, es a menudo obstaculizada por la amplia variabilidad edafoclimática entre los sitios de estudio (Loomis y Connor, 1992). La variabilidad climática y manejo agronómico, tal como fecha de siembra puede ser explorada mediante el empleo de modelos de simulación de cultivos (Kaur *et al.*, 2007) y de esta manera entender los procesos que gobiernan estos sistemas y sus interacciones (Jones *et al.*, 2003).

En trigo se han registrado diversas experiencias exitosas en el uso de modelos para describir y explicar la respuesta de ciertas variedades ante distintos medio ambientes y manejos agronómicos, tal como: fechas de siembra en condiciones

templadas con el modelo CERES-Wheat en trigo blanco (Kaur et al., 2007), distintos regímenes de agua y nitrógeno en medio ambiente mediterráneo con CropSyst para trigo candeal (Pala, 1996), optimización de la fecha de siembra en ambiente mediterráneo con APSIM para trigo candeal (Bassu et al. 2009) y diferentes regímenes hídricos en ambiente mediterráneo con CERES-Wheat en trigo candeal.

Una de las principales limitantes para la aplicación de estos modelos, es que requieren de información de entrada, parámetros del cultivo que representen características específicas de cada genotipo y tengan una baja interacción con el medio ambiente, estos son frecuentemente llamados coeficientes genéticos.

La obtención de los coeficientes genéticos debe realizarse a partir de experimentos en condiciones óptimas de crecimiento (Manlla y Salvagiotti, 2002) y posteriormente se cuantifica el efecto que diversas condiciones de manejo y estrés pueden tener sobre ellos. Cada modelo requiere de un set específico de coeficientes genéticos, es así como los modelos APSIM y CERES-Wheat requieren de sensibilidad a la vernalización, sensibilidad a fotoperiodo, suma térmica desde antesis a madurez fisiológica, tasa máxima de crecimiento de granos, filocrono, entre otros. El modelo CropSyst requiere coeficientes de crecimiento como eficiencia del uso de la radiación, índice de cosecha sin estrés, coeficientes de reparto a órganos vegetativos, coeficientes fenológicos tal como sumas térmicas a emergencia, floración, inicio de llenado de grano y madurez fisiológica, temperatura base de desarrollo, coeficientes morfológicos como profundidad radicular máxima, duración del área foliar, índice de área foliar máxima, coeficiente de extinción de radiación solar, entre otros. El número y tipo de coeficientes necesarios es función de la complejidad del modelo.

## 5. Referencias Bibliográficas

Acevedo, E., Silva, P. y Silva, H. 2002. Chapter: Wheat growth and physiology. Bread wheat: improvement and protection. Curtis, B., Rajaram, S. and Gómez, H. (Ed). Roma 39-51p.

Albrizio, R. and Steduto, P. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology 130:254-268.

Bassu, S., Asseng, S., Motzo, R. and Giunta, F. 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment. Field Crops Research 111:109-118.

Candolle, A. 1855. Géographie Botanique Raisonnée, Maisson, Paris.

Calderini, D., Dreccer, M. and Slafer, G. 1997. Consequences of plant breeding on biomass growth, radiation interception and radiation use efficiency in wheat. Field Crops Research 52:271-281.

Charles-Edwards, and D.A., Thornley, J.H. 1974. Mathematical models and crop science. Span, 17: 57-59.

Del Pozo, A., Garcia, J., Novoa, R. and Cillaseca, S. 1987. Relationship of base temperature to development of spring wheat. Experimental Agriculture 23:21-30.

Forrester, J. W. 1972. Dinámica industrial. El Ateneo. Buenos Aires.

Fundación Chile. 2008. Estudio de competitividad de la cadena del trigo candeal inmerso en el programa de desarrollo de trigo candeal de alta calidad.

Gifford, R., Thorne, T.H., Hitz, W.D. and Giaquinta, R.T. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. Science 225:801-808.

Hay, R. and Walker, A. 1989. An introduction to the physiology of crop yield. Essex, UK, Longman Scientific and Technical 292 p.

Jobet, C. 2007. Trigo en Chile, rol actual del mejoramiento genético. In: Trigo Candeal: Calidad, Mercado y Zonas de Cultivo. Ed. Acevedo, E. y Silva, P. Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 12. Santiago 182 p.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J. Batchelor, W.D. et al. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.

Kaur, M., Singh, K., Singh, H., Singh, P. and Tabasum, S. 2007. Evaluation of model CERES-Wheat (Ver.4.0) under temperate condition of kashmir valley. *World Journal of Agricultural Sciences* 3:825-832.

Kemanian, A., Stockle, C. and Huggins, D. 2004. Variability of barley radiation-use efficiency. *Crop Science* 44:1662–1672.

Manlla, A. y Falvagiotti, F. 2002. Validación del modelo Hybrd Maize en condiciones óptimas de crecimiento. *Boletín infoINTA Santa Fe Sur*.

Matus, I., Madariaga, R. y Jobet, R. 2005. Trigo candeal en la zona centro sur de Chile. *Tierra Adentro* 62:36-38.

Monsi M. and Saeki T. 1953. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* 14: 22–52.

Monteith, J.L., 1994. Principles of resource capture by crop stands. In: Monteith, J.L., Scott, R.K., Unsworth, M.H. (Eds.), *Resource Capture by Crops*. Nottingham University Press, Nottingham, UK, pp. 1–15.

Loomis, R. and Connor, D. 1992. *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

O'Connel, O., Leary, G., Whitfield, D. and 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.

Pala, M., Stockle, C. and Harris, H. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. Durum) growth under different water and nitrogen regimes in a mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems* 51:147-163.

Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D. and Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht pp. 79–98.

Silva, P., Kolopp, J. y Acevedo, E. 2007. Trigo Candéal: ¿dónde cultivar para tener una mejor calidad? pp 89-102. In: *Trigo Candéal: Calidad, Mercado y Zonas de Cultivo*. Ed. Acevedo, E. y Silva, P. Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 12. Santiago. 182 p.

Stockle, C., Donatelli, M. and Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal Agronomy* 18:289-307.

Takahashi, T. and Nakaseko, K. 1990. Seasonal change of Photosynthetically active radiation intercepted by a spring wheat canopy and its relation to dry matter production. *Japan Journal of Crop Sciences* 59:778-784.

Takahashi, T. and Nakaseko, K. 1993. Seasonal changes in distribution of intercepted photosynthetically active radiation for layer and dry matter production in spring wheat canopy. *Japan Journal of Crop Sciences*. 62(2):313-318.

Thornley, J.H.M., Johnson, J.R. 1990. *Plant and crop modelling. a mathematical approach to plant and crop physiology*. Clarendon Press. Oxford.

Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E. 2002. *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola*. Ed. Mundi-Prensa Libros, S.A. España. 125-133p y 147-155p.

Watson DJ (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and with and between years. *Annals of Botany* 11: 41-76.

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

## CAPÍTULO II

### II. Efecto de la fecha de siembra sobre coeficientes genéticos de trigo candeal (*Triticum turgidum* L. ssp. durum) relativos a desarrollo

#### 1. Resumen

El presente trabajo pretende evaluar la sensibilidad a la fecha de siembra de coeficientes genéticos relativos a desarrollo de trigo candeal. El ensayo se realizó en la Estación Experimental Antumapu de la Universidad de Chile en la temporada 2010-2011. Los coeficientes genéticos tiempo térmico fenológico y filocrono fueron determinados en las variedades Llareta INIA y Corcolén INIA en dos fechas de siembra: 19 de Mayo (F1) y 15 de Julio (F2). Los cultivos fueron regados. Los resultados mostraron un efecto significativo de la fecha de siembra en el tiempo térmico entre primer nudo y madurez fisiológica, en este caso el tiempo térmico fue mayor en F1 que en F2. El tiempo térmico para alcanzar primer nudo fue el mismo entre variedades y fechas de siembra. Llareta INIA tuvo un requerimiento térmico mayor que Corcolén INIA para alcanzar antesis, sin embargo Corcolén INIA tuvo un mayor requerimiento a madurez fisiológica. Ambas variedades tuvieron un filocrono similar en F1 ( $134,6^{\circ}\text{C día hoja}^{-1}$  para Llareta INIA and  $132,8^{\circ}\text{C día hoja}^{-1}$  para Corcolén INIA) y F2 ( $116,7^{\circ}\text{C día hoja}^{-1}$  para Llareta INIA y  $114,5^{\circ}\text{C día hoja}^{-1}$  para Corcolén INIA), La tendencia del filocrono a disminuir con la fecha de siembra tardía, no resultó ser significativa.

Palabras claves: Filocrono, Simulación del desarrollo, Tasa de aparición foliar, Tiempo térmico.

## 2. Abstract

The present work aims at testing the sensitivity of genetic coefficients relating to development of durum wheat to sowing date. The trial was conducted at the Experimental Station Antumapu at “Universidad de Chile” in season 2010-2011. Genetic coefficients phenological thermal time and phyllochron were determinate in Llaretta INIA and Corcolén INIA sowing at May 19 (F1) and July 15 (F2). The crops were well watered. Results showed a significant effect of sowing date on thermal time between stem elongation and physiological maturity, in this case thermal time were higher in F1 than F2. The thermal time to reach stem elongation was the same between varieties and sowing dates. Llaretta INIA had higher thermal requirement than Corcolén INIA to reach anthesis, however Corcolén INIA had a higher requirement to achieve physiological maturity. Both varieties had a similar phyllochron in F1 ( $134,6^{\circ}\text{C day leaf}^{-1}$  for Llaretta INIA and  $132,8^{\circ}\text{C day leaf}^{-1}$  for Corcolén INIA) and F2 ( $116,7^{\circ}\text{C day leaf}^{-1}$  for Llaretta INIA and  $114,5^{\circ}\text{C day leaf}^{-1}$  for Corcolén INIA). Despite the decreasing trend of phyllochron in late sowing date, the differences were not significant.

Keywords: Phyllochron, Development models, Leaf appearance rate, Thermal time.

### 3. Introducción

El trigo candeal, empleado en la producción de pastas, se produce en la zona central de Chile, con clima mediterráneo, concentrándose el 90% de la producción en áreas regadas, supliendo el 50% de la demanda nacional (Silva *et al.*, 2007). Su producción ha sido progresivamente desplazada hacia la zona sur del país, por el uso del suelo en explotaciones de mayor rentabilidad, habiendo superficies importantes hasta la región de la Araucanía.

Cambios de las zonas productivas conllevan cambios importantes en el medio ambiente, donde en términos meteorológicos se producen cambios interanuales e intraanuales importantes. La elección de fecha de siembra y variedad constituyen los manejos principales ante cambios de la zona productiva, particularmente en medio ambiente de tipo mediterráneo (Turner, 2004). Ante esta situación, el uso de modelos de simulación de cultivos es una alternativa válida para afrontar este tipo de problemas. Se han realizado muchos estudios han sido llevado a cabo con modelos para investigar el desempeño de diferentes variedades en un amplio rango de fechas de siembra (Heng *et al.*, 2007; Asseng *et al.*, 2008). Para que la simulación sea llevada a cabo exitosamente, es particularmente importante una predicción precisa de la fecha de antesis (Stapper y Lilley, 2001), esto en términos de decidir fechas de siembras que permitan que la antesis ocurra bajo las mejores condiciones ambientales, particularmente de disponibilidad de agua, una alta relación radiación temperatura y baja probabilidad de ocurrencia de heladas. Uno de los métodos más simples para predecir la fenología de un cultivo es la acumulación de tiempo térmico, definido como la sumatoria de la diferencia entre la temperatura media diaria del aire y una temperatura base, cuantificado como suma térmica fenológica ( $^{\circ}\text{C día}$ ), desde el inicio y fin de una fase fenológica o desde el inicio y el fin de la expansión de un órgano (en el caso de hojas la suma térmica entre la expansión de dos hojas consecutivas recibe el nombre de filocrono) (McMaster, 1997; Slafer y Rawson, 1997). Tanto suma térmica fenológica como filocrono han sido utilizados en muchos modelos de crecimiento y desarrollo, tal como CERES-Wheat (Ritchie, 1991; Dettorri *et al.*, 2011) y APSIM en trigo candeal (Bassu *et al.*, 2009). Estos parámetros son considerados coeficientes genéticos, dado que son particulares de cada genotipo, y bajo condiciones potenciales de cultivos son constantes.

#### **4. Hipótesis**

Las sumas térmicas fenológicas y el filocrono de trigo candeal, variedades Llaretá INIA y Corcolén INIA, no varían en función de la fecha de siembra.

#### **5. Objetivos**

##### **5.1. Objetivo general**

Determinar y evaluar la sensibilidad de los coeficientes genéticos relacionados con el desarrollo de las variedades Llaretá INIA y Corcolén INIA en dos fechas de siembra.

##### **5.2. Objetivos específicos**

Para ambas fechas de siembra y variedades determinar sumas térmicas entre emergencia y primer nudo, embuche, espigadura, anthesis y madurez fisiológica.

Para ambas fechas de siembra y variedades determinar la tasa de aparición foliar y Filocrono.

## 6. Materiales y Métodos

### 6.1. Ubicación del experimento y condición edafoclimática

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Región Metropolitana, Chile (33°40´m latitud sur, 70°38´ longitud oeste y 605 m.s.n.m.).

Antumapu se encuentra en una zona de clima templado mesotermal estenotermico mediterráneo semiárido. Las temperaturas anuales varían entre una máxima promedio de 29°C en Enero, y una mínima también promedio de 2,8°C en Julio. Además, tiene 1.527,75 días-grados /base 10°C) por año, 1.232 horas frío calculadas por año y una precipitación media anual de 369,5 mm. (INIA, 1989).

El suelo está incluido en la Serie Santiago (CIREN, 1996), de origen aluvial, ligeramente profundos con topografía plana, con o sin microrelieve, en posición de gran cono aluvial. Con textura franco arenosa fina en superficie.

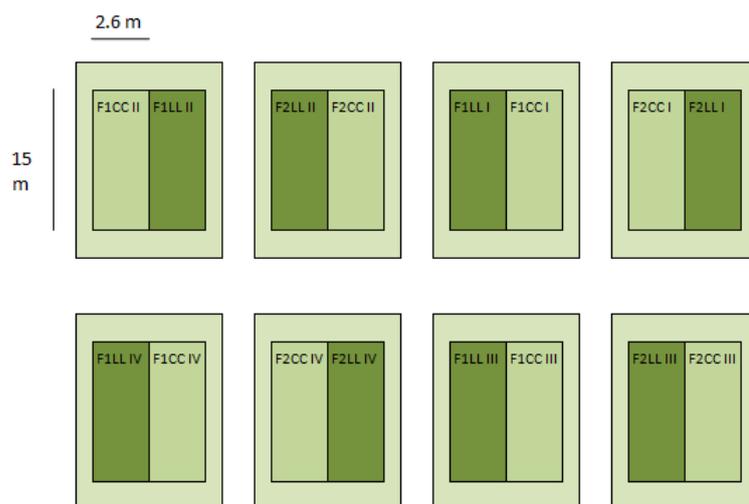
### 6.2. Diseño del experimento y labores culturales

En el Cuadro 1.II se observan los 4 tratamientos constituidos por los factores fecha de siembra y variedad con 2 niveles cada uno.

**Cuadro 1.II:** Composición de los tratamientos.

<b>Tratamiento</b>	<b>Fecha de siembra</b>	<b>Variedad</b>
<b>F1LL</b>	19.05.2010	Llaretta
<b>F1CC</b>	19.05.2010	Corcolén
<b>F2LL</b>	15.07.2010	Llaretta
<b>F2CC</b>	15.07.2010	Corcolén

El diseño experimental fue de parcelas divididas en bloques completos al azar, con 4 repeticiones y estructura factorial de tratamientos (2x2). La fecha de siembra constituye la parcela principal y la variedad de trigo candeal constituye la sub-parcela (Figura 1.II). La unidad experimental es de 15 m de largo y 2,6 m de ancho.



**Figura 1.II:** Distribución de los tratamientos en campo. F1: Fecha de siembra 19.05.2010, F2: Fecha de siembra 15.07.2010, CC: Variedad Corcolén INIA y LL: Variedad Llareta INIA.

El trigo candeal fue sembrado de forma mecanizada, con una distancia entre hilera de 20 cm y una dosis de 150 kg ha<sup>-1</sup> de semilla, en un suelo previamente arado y rastreado.

La dosis de fertilización nitrogenada fue de 160 Kg N ha<sup>-1</sup> en forma de urea (46-0-0), calculada en base a la demanda de un cultivo con un rendimiento esperado de 7 Mg ha<sup>-1</sup>. Se parcializó 1/3 a la siembra y 2/3 al estado de primer nudo. Se realizó un análisis químico de suelos previo a la siembra del cultivo para definir los requerimientos de fósforo y potasio, resultando en dosis de 120 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> a la siembra en forma de superfosfato triple (0-48-0) y 0 kg de K<sub>2</sub>O.

Se procedió al control de plagas, enfermedades y malezas de manera de asegurar un crecimiento óptimo.

El experimento fue realizado bajo condiciones de riego, considerando un umbral de riego del 50% de la humedad aprovechable. El contenido de agua del suelo fue monitoreado periódicamente mediante el uso de FDR (Diviner 2000, Sentek technologies, Australia).

### 6.3. Mediciones

#### 6.3.1. Seguimiento del estado de desarrollo del cultivo

El estado de desarrollo del cultivo fue estudiado en base a la escala decimal Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974) dos veces por semana, considerando finalizada cada fase cuando el 50% de la unidad experimental se encontró en ella. Los eventos fenológicos registrados fueron emergencia, primer nudo, embuche, espigadura, antesis y madurez fisiológica.

#### 6.3.2. Número de hojas en el tallo principal

Se contó el número de hojas totalmente expandidas del tallo principal con una frecuencia de 2 semanas desde emergencia hasta hoja bandera, a partir de una muestra constituida de 5 plantas por unidad experimental.

### 6.4. Estimaciones

#### 6.4.1. Cuantificación del desarrollo del cultivo en base a tiempo térmico

Se registró la suma térmica entre emergencia y los estados de primer nudo ( $ST_{pn}$ ), embuche ( $ST_{em}$ ), espigadura ( $ST_{esp}$ ), antesis ( $ST_a$ ) y madurez fisiológica ( $ST_m$ ) en ambas variedades y fechas de siembra. La suma térmica requerida para completar cada etapa fenológica se estimó mediante la ecuación 1.II (De Candolle, 1855).

$$ST = \sum_{i=t_i}^{t_f} (TMD_i - T_b) \quad [1.II]$$

si  $ST < 0$  entonces  $ST = 0$

Donde  $ST$  es la suma térmica ( $^{\circ}C$  d) desde el inicio de una etapa fenológica ( $i$ ) hasta su fin ( $f$ ),  $TMD$  es la temperatura media ( $^{\circ}C$ ) y  $T_b$  es la temperatura base de desarrollo del cultivo ( $^{\circ}C$ ). Se consideró una temperatura base constante durante el ciclo del cultivo de  $0^{\circ}C$  (Kirby, 1985; Baker *et al.*, 1986; Amir y Sinclair, 1991)

#### 6.4.2. Tasa de aparición foliar

La tasa de aparición foliar (TAF) fue estimada durante el periodo de aparición foliar, a partir de la pendiente de la relación lineal existente entre el número de hojas del tallo principal y el tiempo térmico acumulado, considerando una temperatura base de 0°C.

$$NHTP = TAF ST + b \quad [2.II]$$

Donde *NHTP* es el número de hojas en el tallo principal, *TAF* es la tasa de aparición foliar, *ST* es la suma térmica y *b* es un parámetro de regresión que representa el número de hojas en el tallo principal cuando el tiempo térmico es 0.

Finalmente el filocrono (PHLN) quedó definido como el inverso multiplicativo de la TAF (Ecuación 3.II).

$$PHLN = TAF^{-1} \quad [3.II]$$

Donde *PHLN* es el filocrono (°C d) y *TAF* es la tasa de aparición foliar del cultivo.

En forma independiente, se evaluó el filocrono por análisis de regresión, relacionando la suma térmica con el número de hojas del tallo principal, con el objetivo de evaluar las similitudes de ambas metodologías.

#### 6.5. Información meteorológica

La información meteorológica necesaria para realizar las estimaciones (temperatura media diaria del aire), fue obtenida a partir de una estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental La Platina del INIA ubicado aproximadamente a 500 m del lugar de estudio.

## 6.6. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de Suma Térmica fueron sometidos a un ANDEVA mediante el programa Minitab ® 16.1.0. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_k + FS_i + \delta_{ik} + V_j + (FSxV)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad [4.II]$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Respuesta en la j-ésima sub-parcela, de la i-ésima parcela principal, en el k-ésimo bloque;  $\beta_k$  = Efecto del k-ésimo bloque;  $FS_i$  = Efecto de la i-ésima parcela principal;  $\delta_{ik}$  = Error PS, debido a la aleatorización de parcelas principales;  $V_j$  = Efecto de la j-ésima sub-parcela;  $(FSxV)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre la i-ésima parcela principal con la j-ésima sub-parcela y  $\varepsilon_{ijk}$ : Error V, debido a la aleatorización de la sub-parcela dentro de cada parcela principal.

Al identificarse diferencias significativas entre tratamientos, las medias fueron separadas mediante test de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

La estimación de las rectas de regresión se realizó mediante el método de mínimos cuadrados (Steel y Torrie, 1985). Para esto se utilizó el programa Microsoft ® Office Excel ®. Las funciones de regresión obtenidas para ambas variedades y fechas de siembra fueron sometidas a un test de paralelismo (Cumsille, 1995) basado en una prueba de hipótesis bilateral tipo  $t$  de Student para identificar diferencias significativas entre sus coeficientes.

$$t = \frac{b_0 - b_1}{\sqrt{S^2 \frac{1}{SC_{x1}} + \frac{1}{SC_{x2}}}} \sim t_{n_0+n_1-4} \quad [5.II]$$

Donde  $b$  corresponde a los parámetros de regresión a comparar,  $S^2$  es la varianza ponderada,  $SC_{x1}$  la suma de cuadrados de  $x$  y  $n$  el número de observaciones que compone cada regresión.  $S^2$  fue calculada como sigue:

$$S^2 = \frac{SC_{residual\ 0} + SC_{residual\ 1}}{n_0 + n_1 - 4} \quad [5.1. II]$$

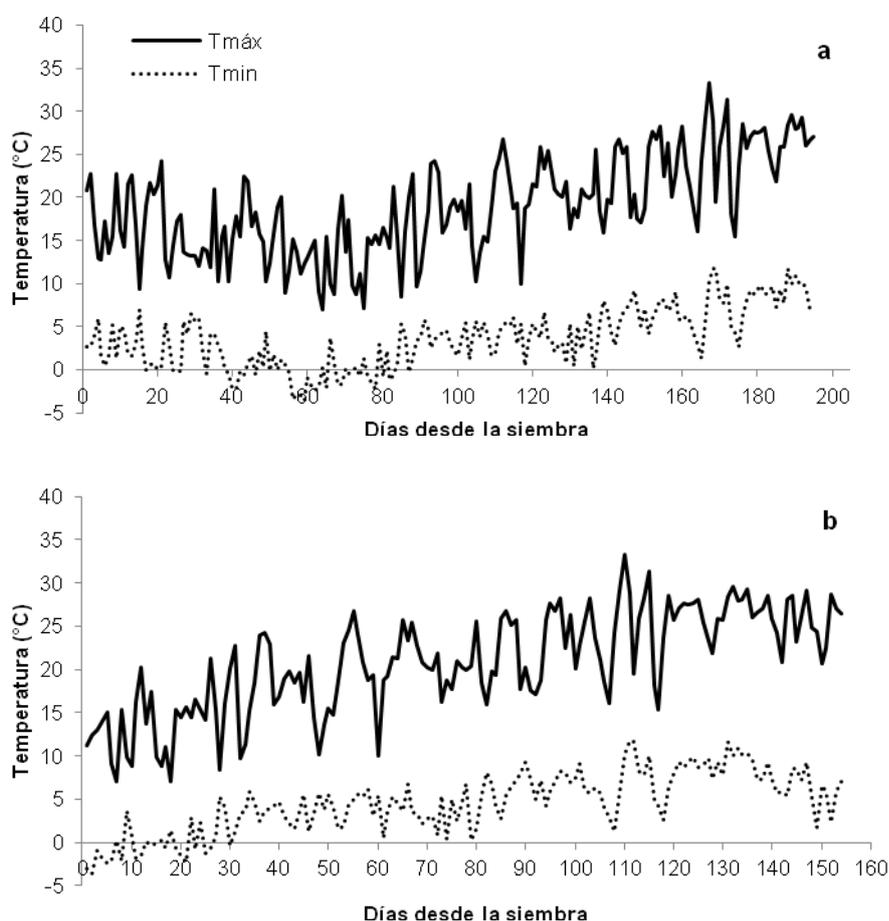
Donde  $SC_{residual}$  es la suma de cuadrados de los residuales del análisis de regresión. La suma de cuadrados de  $x$  ( $SC_x$ ) fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$SC_x = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad [5.2. II]$$

## 7. Resultados y Discusión

### 7.1. Temperatura del aire y duración de las fases fenológicas

La Figura 2.II muestra las temperaturas máximas y mínimas del aire en las fechas de siembra estudiadas. La fecha de siembra 1 (Fig. 2.II a) estuvo expuesta a temperaturas sustantivamente más bajas que la fecha de siembra 2, no obstante estas ocurrieron en estado vegetativo, por lo que no se observaron daños por frío o heladas. El cultivo no experimentó largos periodos de temperaturas máximas por sobre 32°C, manteniéndose dentro de rangos óptimos (Skylas et al., 2002), por lo que no es de esperar que el cultivo haya estado expuesto a estrés por temperatura.



**Figura 2.II:** Temperatura máxima y mínima de la temporada de estudio en ambas fechas de siembra. a: 19 de mayo 2010; b: 15 de julio 2010.

Al atrasar la fecha de siembra se observó una reducción de la duración del ciclo de desarrollo en términos de días calendario para ambas variedades. En un primera instancia esto se debe a que el cultivo en la segunda fecha de siembra estuvo

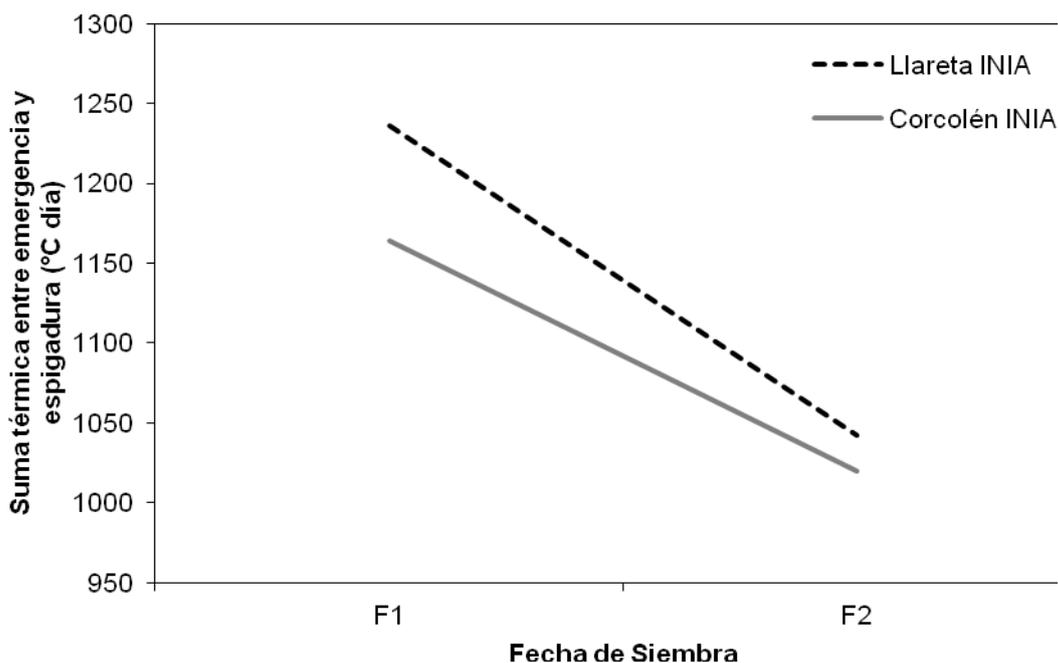
expuesto a temperaturas más altas durante su ciclo (Fig. 2.II b) Independiente de la diferencia en términos de días desde la siembra, era esperable que las sumas térmicas fenológicas fuesen similares independiente de la fecha de siembra, dado que se genera una compensación, menor número de días a una mayor temperatura. Esto ocurrió solo para la suma térmica desde emergencia a primer nudo, pero no para las siguientes fases fenológicas. El Cuadro 2.II muestra las ST promedio para cada evento fenológico evaluado.

**Cuadro 2.II:** Medias de las sumas térmicas de cada evento fenológico registrado en trigo candeal en dos fechas de siembra.

	<b>ST<sub>pn</sub></b> °C día	<b>ST<sub>em</sub></b> °C día	<b>ST<sub>esp</sub></b> °C día	<b>ST<sub>a</sub></b> °C día	<b>ST<sub>m</sub></b> °C día
<b>Fecha de Siembra</b>					
F1	516,5	1139,6 a	1200,0 a	1327,7 a	2079,4 a
F2	511,8	918,4 b	1030,8 b	1132,1 b	1792,8 b
P	0,08	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<b>Variedad</b>					
LL	514,8	1067,3 a	1138,8 a	1242,8 a	1913,2 b
CC	513,5	990,7 b	1091,9 b	1217,1 b	1959,0 a
P	0,58	<0,0001	<0,0001	0,022	<0,0001
<b>Fecha de Siembra x Variedad</b>					
F1LL	514,6	1176,2	1235,7 a	1340,1	2061,7
F1CC	518,5	1103,0	1164,3 b	1315,3	2097,0
F2LL	515,1	958,3	1042,0 c	1145,4	1764,7
F2CC	508,5	878,5	1019,5 d	1118,9	1821,0
P	0,055	0,592	0,001	0,92	0,098

P es la probabilidad asociada a cada fuente de variación entregado por el ANDEVA, ST<sub>pn</sub>: suma térmica desde emergencia a primer nudo; ST<sub>em</sub>: suma térmica desde emergencia a embuche; ST<sub>esp</sub>: suma térmica desde emergencia a espigadura; ST<sub>a</sub>: suma térmica desde emergencia a antesis; ST<sub>m</sub>: suma térmica desde emergencia a madurez fisiológica, F1: Fecha de siembra 19.05.2010; F2: Fecha de siembra 15.07.2010; CC: Variedad Corcolén INIA y LL: Variedad Llaleta INIA. Letras diferentes indican diferencia significativa en sentido horizontal para Fecha de siembra, Variedad y Fecha de Siembra x Variedad de forma independiente, según test de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). La temperatura base ( $T_b$ ) considerada para el cálculo fue de 0°C.

La ST entre emergencia y primer nudo no fue afectada significativamente por la fecha de siembra, con un promedio de  $514,5 \pm 6,95$  °C día. La fecha de siembra tuvo un efecto significativo para la ST entre emergencia y embuche, anthesis y madurez fisiológica. En todos estos casos la fecha de siembra temprana (F1; 19.05.2010) tuvo valores mayores de ST, en el orden de 200 °C día superior a la fecha de siembra tardía (F2; 15.07.2010). La variedad tuvo un efecto significativo sobre todas las ST con excepción del periodo entre emergencia y primer nudo. En todos los casos Llaretta INIA tuvo un requerimiento térmico mayor que Corcolén INIA, exceptuando el ciclo completo, donde Corcolén INIA tuvo una mayor acumulación reflejado en la mayor suma térmica entre emergencia y madurez fisiológica. Para la ST entre emergencia y espigadura la interacción Fecha de Siembra x Variedad resultó ser significativa, no obstante la tendencia fue similar a la de los casos anteriores.



**Figura 3.II:** Interacción entre fecha de siembra y variedad para la variable Suma térmica entre emergencia y espigadura. Línea negra segmentada Llaretta INIA, Línea gris Conrcolén INIA.

Bassu *et al.* (2009) al calibrar el modelo APSIM, midieron la suma térmica entre anthesis y madurez fisiológica para tres variedades de trigo candeal (Simeto, Colosseo y Creso), obteniendo un valor promedio de 700 °C día, similares a los

medidos en este estudio, independiente del efecto de la fecha de siembra, siendo en F1 751,7 °C día y en F2 660,7 °C día (91 °C día de diferencia), mientras que la llegada a antesis requirió 1327,7 °C día para F1 y 1132,1 °C día para F2 (195,6 °C día de diferencia). Ante esto es posible inferir que las variedades chilenas de trigo candeal tengan uno o más genes de sensibilidad fotoperiódica de tipo cualitativo interesantes de estudiar dado que la fecha de siembra tiene un efecto mayor sobre la fenología del cultivo hasta antesis y se reduce durante el llenado de granos. Es un hecho que las variedades invernales tienen una sensibilidad a fotoperiodo mucho mayor que las primaverales (Slafer y Rawson, 1996) y se ha descrito que Llaretta INIA y corcolén INIA no debiesen mostrar evidencias de sensibilidad al fotoperiodo en el rango de fechas usados en este estudio.

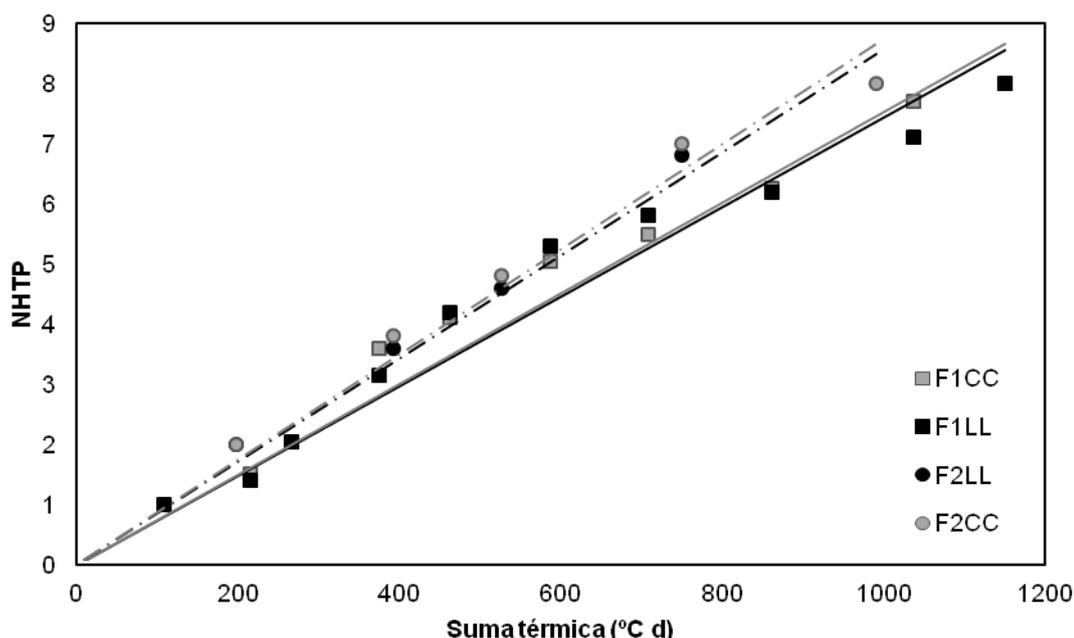
Existen otras variables ambientales que pueden causar una aceleración de la fenología, particularmente bajo condiciones de estrés hídrico y otros que provoquen cierre estomático, y por tanto generen un aumento de la temperatura del cultivo al limitar la refrigeración de la planta por flujo de calor latente (Stockle *et al.* 2003). Bajo estas condiciones, la temperatura del aire es menor a la del cultivo, por lo tanto al utilizarla en el cálculo de suma térmica, se genera una estimación del requerimiento térmico que resulta ser menor del real.

Román (2009) determinó las sumas térmicas fenológicas para la variedad Llaretta INIA de trigo candeal desde emergencia a antesis y desde emergencia a madurez fisiológica, con valores de 1034,8 y 1957,0 °C día respectivamente, mientras que para la variedad Corcolén INIA los valores fueron de 1028,5 °C día desde emergencia a antesis y 2004,5 °C día desde emergencia a madurez fisiológica. Valores muy similares a los medidos en el presente estudio (ambos cálculos se realizaron con una temperatura base de 0°C).

## **7.2. Tasa de aparición foliar**

La relación entre la ST desde la emergencia del cultivo y el número de hojas en el tallo principal (NHTP) resultó ser de tipo lineal (Fig. 4.II) y constante a lo largo de la temporada. En todos los casos, el intercepto de la regresión en el eje de las ordenadas no resultó ser diferente de cero ( $P \geq 0,05$ ), por lo que se forzó a la

regresión a cruzar por el origen. Las observaciones fueron ajustadas a la ecuación 2.II.



**Figur**

**a 4.II:** Regresión entre el número de hojas del tallo principal y la suma térmica desde emergencia durante el ciclo del cultivo de trigo candeal. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

El número máximo de hojas en el tallo principal en ambas variedades de trigo candeal fue de 8. En ambas fechas de siembra el momento de expansión de la última hoja (hoja bandera) fue entre la fase fenológica de embuche y espigadura.

El Cuadro 3.II muestra la TAF para ambas variedades y fechas de siembra. La ST explicó al menos el 86,87% de la variación observada en el NHTP.

**Cuadro 3.II:** Tasa de aparición foliar (TAF) para ambas variedades fechas de siembra.

Tratamiento	TAF <sup>a</sup> Hojas °C <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	n	R <sup>2</sup> <sub>ajustado</sub> %
-	-	-	-
F1LL	7,42 10 <sup>-3</sup> a	10	92,9
F1CC	7,52 10 <sup>-3</sup> a	10	92,6
F2LL	8,56 10 <sup>-3</sup> a	5	87,0
F2CC	8,73 10 <sup>-3</sup> a	5	86,9

<sup>a</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no tienen diferencias significativas de acuerdo a una prueba t ( $p \geq 0,05$ ). n representa el número de observaciones utilizadas en la

regresión y  $R^2$  es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

Las variedades de trigo candeal estudiadas no fueron diferentes entre sí, resultado que concuerda con lo observado por Román (2009) para las mismas variedades en condiciones similares a las del presente estudio, quien registró para Llareta una TAF de  $9,32 \times 10^{-3}$  hojas  $^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ día}^{-1}$  y Corcolén un valor de  $8,91 \times 10^{-3}$  hojas  $^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ día}^{-1}$  los cuales son similares a los obtenidos en el presente estudio. La fecha de siembra no tuvo un efecto significativo sobre la tasa de aparición foliar. Pourreza *et al.* (2009) evaluaron la tasa de aparición foliar de diferentes cultivares de trigo primaveral en 2 temporadas de cultivo, obteniendo valores que fluctuaron entre  $7,7 \times 10^{-3}$  y  $8,2 \times 10^{-3}$  hojas  $^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . TAF tiene una baja interacción con el medio ambiente, en este caso año y fecha de siembra

### 7.3. Filocrono

El filocrono (PHLN) fue calculado como el inverso multiplicativo de la TAF (Ecuación 3.II), donde si bien la TAF no resultó tener diferencias significativas entre tratamientos, el PHLN disminuyó considerablemente su magnitud desde F1 a F2, mientras que fue bastante similar entre variedades (Cuadro 4.II).

**Cuadro 4.II:** Filocrono del cultivo de trigo candeal para ambas variedades bajo dos fechas de siembra. F1: Fecha de siembra 19.05.2010; F2: Fecha de siembra 15.07.2010.

Tratamiento	PHLN $^{\circ}\text{C} \text{ día hoja}^{-1}$
-	
F1LL	134,63
F1CC	132,83
F2LL	116,71
F2CC	114,50

Se realizó un análisis de regresión entre la suma térmica y el número de hojas del tallo principal (Cuadro 5.II) de manera de probar si ambos métodos de estimación de PHLN difieren entre sí, y de no ser así someter este coeficiente genético a análisis estadístico. Las pendientes de la relación entre la suma térmica y el número de hojas en el tallo principal resultaron en magnitudes muy similares a las registradas en el Cuadro 4.II. Al someter las regresiones a un test de paralelismo, resultaron no ser estadísticamente diferentes, esto es atribuible al bajo número de observaciones

utilizadas (n), por lo que puede seguir siendo válida la tendencia a una disminución al atrasar la fecha de siembra.

**Cuadro 5.II:** Filocrono estimado mediante análisis de regresión para ambas variedades de trigo candeal y bajo dos fechas de siembra. F1: Fecha de siembra 19.05.2010; F2: Fecha de siembra 15.07.2010.

Tratamiento	PHLN <sub>regresión</sub> <sup>a</sup>	n	R <sup>2</sup> <sub>ajustado</sub>
-	°C día hoja <sup>-1</sup>	-	%
F1LL	133,9 a	10	87,8
F1CC	131,8 a	10	88,1
F2LL	116,3 a	5	74,6
F2CC	113,8 a	5	74,4

<sup>a</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no tienen diferencias significativas de acuerdo a una prueba t ( $p \leq 0,05$ ). n representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

Román (2009) obtuvo valores de PHLN de 107,33 y 112,18 °C día hoja<sup>-1</sup> para Llaretta INIA y Corcolén INIA respectivamente, sembrado el 29 de junio de la temporada 2007-2008, fecha relativamente cercana a F2 del presente estudio, la cual tuvo valores similares de PHLN. Pourreza *et al.* (2009) encontraron PHLN entre 122 y 130 °C día hoja<sup>-1</sup> en una experiencia realizada con 15 variedades de trigo harinero de hábito primaveral.

La disminución observada del valor de PHLN con atrasos en la fecha de siembra fue consistente con lo indicado en un experimento llevado a cabo en trigo candeal regado en Sardinia, Italia por Bassu *et al.* (2009), quienes obtuvieron PHLN mayores en siembras de octubre, con medias de 152 °C día hoja<sup>-1</sup> el 2000 y 132 °C día hoja<sup>-1</sup> el 2001, mientras que los menores valores promedio los obtuvieron con fechas de siembra de marzo del 2000 y 2001, del orden de 88 y 76 °C día hoja<sup>-1</sup> respectivamente.

Jamieson *et al.* (2008) en un estudio realizado con trigo candeal en tres fechas de siembra por año durante seis años. Observaron que el filocrono disminuyó a medida que atrasaba la fecha de siembra. En el mismo estudio se evaluó el efecto de la fuente de calor en la variabilidad del filocrono, obteniendo un promedio para las 6

fechas de siembra de  $104 \pm 10,01$  °C día hoja<sup>-1</sup> cuando la fuente era la temperatura media del aire y  $114,83 \pm 2,54$  °C día hoja<sup>-1</sup> cuando el cálculo era realizado en base a la temperatura media del suelo (2 cm de profundidad). El PHLN calculado en base a la temperatura del suelo fue mucho más estable, lo que es atribuible a que aquella temperatura es más representativa de la temperatura que realmente sensa el ápice de crecimiento en cereales, el cual se encuentra bajo la superficie del suelo durante un periodo importante de su desarrollo, el cual coincide con la definición del número de hojas, y por tanto se reduce el error generado al utilizar la temperatura del aire. Además la temperatura media del suelo fue consistentemente superior a la media del aire. De manera de confirmar lo antes expuesto, en el mismo estudio se asoció la temperatura del ápice de crecimiento y la del suelo a 10 cm a los 46 días desde la siembra, mostrando una asociación positiva y significativa ( $r=0,952$ ).

Muchos trabajos han evaluado la relación existente entre el PHLN y el fotoperiodo (Stapper, 1984; Slafer y Rawson, 1997; Bassu *et al.*, 2009), donde aumentos en el largo del día generan reducciones en el PHLN. Esta relación ha sido utilizada para generar PHLN particulares para cada fecha de siembra. Baker *et al.* (1980) encontraron una alta asociación entre el PHLN y el fotoperiodo a los 90 días después de la emergencia de trigo invernal y primaveral, al igual que Bassu *et al.* (2009) al asociar el PHLN de trigo candeal con el fotoperiodo a los 73 días después de la siembra. Lo antes mencionado indica que el largo de día tiene una influencia importante en la tasa de aparición foliar y por tanto en el filocrono.

Al parecer la variación en el filocrono es atribuible a un error generado por la temperatura, más que a la acción de algún mecanismo biológico que capte la diferencia en las fechas de siembra y modifique la tasa de aparición de hojas tal como fotoperiodo o relación rojo/rojo lejano. Poter y Delecolle (1988) encontraron que la relación rojo/rojo lejano y el largo del día tenían una pobre asociación, por lo que sería difícil atribuir la variabilidad observada en PHLN a este factor ambiental.

## **8. Conclusiones**

La fecha de siembra no cambia el requerimiento térmico entre emergencia y primer nudo, pero si entre primer nudo y madurez fisiológica, siendo mayor en la fecha de siembra temprana.

El requerimiento térmico entre emergencia y antesis es mayor en Llareta INIA, sin embargo Corcolén INIA tiene un requerimiento térmico de ciclo completo superior al de Llareta INIA.

El filocrono fue constante entre variedades y fechas de siembra.

Bajo las condiciones del estudio la hipótesis planteada es rechazada.

## 9. Referencias Bibliográficas

Amir, J. and Sinclair, T. 1991. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28:47-58.

Asseng, S., Milroy, S. and Poole, M. 2008. Systems analysis of wheat production on low water-holding soils in a Mediterranean-type environment I. Yield potential and quality. *Field Crops Research* 105:97–106.

Baker, C., Gallagher, J. And Montheith, J. 1980. Daylength change and leaf appearance in winter wheat. *Plant Cell and Environment* 3:285-287.

Baker, J., Pinter, P., Reginato, R. and Kanemasu E. 1986. Effects of temperature on leaf appearance in spring and winter wheat cultivars. *Agronomy Journal* 78:605-613.

Bassu, S., Asseng, S., Motzo, R. and Giunta, F. 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment. *Field Crops Research* 111:109-118.

Candolle, A. 1855. *Géographie Botanique Raisonnée*, Maisson, Paris.

CIREN. 1996. Descripción de suelos materiales y símbolos. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N°115.

Cumsille, F. 1995. *Métodos estadísticos*. Publicaciones Universidad de Chile, Facultad de Medicina. 37-45p.

Dettoni, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D. and Duce, P. 2011. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy. *Field Crops Research* 120:179-188.

Heng, L., Asseng, S., Mejahed, K. and Rusan, M. 2007. Optimizing wheat productivity in two rain-fed environments of the West Asia-North Africa region using a simulation model. *European Journal of Agronomy* 26:121–129.

INIA. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Novoa, R. y Villaseca, S. (Eds). 221p.

Jamieson, P., Brooking, I., Zyskowski, R. and Munro, C. 2008. The vexatious problem of the variation of the phyllochron in wheat. *Field Crops Research* 108:163-168.

Kirby, E. 1985. Significant stages of ear development in winter wheat. In: Day, W., Atkin, R.K. (Eds.), *Wheat Growth and Modelling*. NATO ASO Series. Serie A: Life Sciences, vol. 86, Plenum Press, London.

McMaster, G.S., 1997. Phenology, development, and growth of the wheat shoot apex, a review. *Advance in Agronomy* 59: 63–118.

Porter, J.R., and Delecolle, R., 1988. Interactions between temperature and other environmental factors in controlling plant development. In: Long, S.P., Woodward, F.I. (Eds.), *Society for Experimental Biology, Symposium Series*, vol. 24. Cambridge University Press, pp. 133–156.

Pourreza, J., Soltani, A., Naderi, A. and Aynehband, A. 2009. Modeling leaf production and Senescence in wheat. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environment Science* 6:498-507.

Ritchie, J.T. 1991. Wheat phasic development. In: Hanks, R.J., Ritchie, J.T. (Eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 31–54pp.

Román, L. 2009. Determinación de coeficientes genéticos en trigo candeal (*Triticum turgidum* ssp. durum L.) variedades Llaleta y Corcolén INIA en condiciones óptimas. Tesis para optar al grado de Magister en Cs. Agropecuarias. Fac. de Cs. Agronómicas, Universidad de Chile. 62p.

Silva, P., Kolopp, J. y Acevedo, E. 2007. Trigo Candeal: ¿dónde cultivar para tener una mejor calidad? pp 89-102. In: *Trigo Candeal: Calidad, Mercado y Zonas de Cultivo*. Ed. Acevedo, E. y Silva, P. Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 12. Santiago. 182 p.

Skyllas, D., Cordwell, S., Hains, P., Larsen, M., Basseal, D., Walsh, B., Blumenthal, C., Rathmell, W., Copeland, L. and Wrigley, C. 2002. Heat shock of wheat during grain filling: proteins associated with heat-tolerance. *Journal of Cereal Science* 35:175-188.

Slafer, G. and Rawson, M. 1996. Responses to photoperiod change with phenophase and temperature during wheat development. *Field Crops Research* 46: 1-13.

Slafer, G. and Rawson, H. 1997. Phyllochron in wheat as affected by photoperiod under two temperature regimes. *Australian Journal of Plant Physiology* 24:151-158.

Stapper, M. 1984. SIMTAG. A simulation model of wheat genotypes. Model documentation. ICARDA, Aleppo, Syria and Univ. Of New England, Armidale, N.S.W., Australia, 108 p.

Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1985. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. Mcgraw-Hill. Mexico. 622 p.

Stockle, C., Donatelli, M. and Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18:298-307.

Turner, N.C., 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany* 55, 2413–2425.

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

## 10. Anexos

### 10.1. Productos fitosanitarios, fecha y dosis de aplicación.

Fecha	Nombre comercial	Ingrediente activo	Dosis	Tipo
Previo siembra	Anagran plus	Mancozeb, Carbendazin	125 g/100 kg semilla <sup>-1</sup>	F
13 julio	Ajax	Metsulfuron metil	10 g/ha	HA
6 sept	Pirimor	Piricarb	250 g/ha	I
30 sept	Pirimor	Piricarb	250 g/ha	I

F: funguicida, I: insecticida, HA: herbicida hoja ancha.

### 10.2. Análisis de varianza de sumas térmicas

#### ANÁLISIS DE VARIANZA: Suma térmica entre emergencia y primer nudo

Fuente	G.L.	SC	CM	F	P
Fecha de siembra	1	89,3	89,3	7,2	0,075
Error Fecha de siembra	3	37,21	12,4	0,64	0,616
Variedad	1	6,76	6,76	0,35	0,576
Fecha de siembra x Variedad	1	109,2	109,2	5,65	0,055
Error	6	115,96	19,33		
Total	15	725,16			

#### ANÁLISIS DE VARIANZA: Suma térmica entre emergencia y embuche

Fuente	G.L.	SC	CM	F	P
Fecha de siembra	1	195718	195718	38603,11	0
Error Fecha de siembra	3	15	5	0,04	0,989
Variedad	1	23424	23424	177,72	0
Fecha de siembra x Variedad	1	42	42	0,32	0,592
Error	6	791	132		
Total	15	220766			

#### ANÁLISIS DE VARIANZA: Suma térmica entre emergencia y espigadura

Fuente	G.L.	SC	CM	F	P
Fecha de siembra	1	114531	114531	934,49	0
Error Fecha de siembra	3	368	123	1,95	0,223
Variedad	1	8822	8822	140,24	0
Fecha de siembra x Variedad	1	2394	2394	38,05	0,001
Error	6	377	63		
Total	15	126502			

#### ANÁLISIS DE VARIANZA: Suma térmica entre emergencia y antesis

Fuente	G.L.	SC	CM	F	P
Fecha de siembra	1	152998	152998	2109,72	0
Error Fecha de siembra	3	218	73	0,26	0,853
Variedad	1	2632	2632	9,37	0,022
Fecha de siembra x Variedad	1	3	3	0,01	0,92
Error	6	1684	281		
Total	15	159002			

**ANÁLISIS DE VARIANZA: Suma térmica entre emergencia y madurez fisiológica**

Fuente	G.L.	SC	CM	F	P
Fecha de siembra	1	328415	328415	5807,49	0
Error Fecha de siembra	3	170	57	0,49	0,7
Variedad	1	8386	8386	73,2	0
Fecha de siembra x Variedad	1	438	438	3,82	0,098
Error	6	687	115		
Total	15	341416			

**10.3. Valores medidos de sumas térmicas y número de hojas en ambas fechas de siembra y variedades.**

Fecha 1			
Fecha	Suma térmica	N° Hojas Liareta	N° Hojas Corcolén
10.06.2010	108,75	1	1
22.06.2010	215,50	1,4	1,5
29.06.2010	265,95	2,05	2,05
12.07.2010	375,30	3,15	3,6
27.07.2010	462,40	4,2	4,1
13.08.2010	587,20	5,3	5,05
24.08.2010	707,75	5,8	5,5
07.09.2010	861,35	6,2	6,25
21.09.2010	1036,75	7,1	7,7
01.10.2010	1150,65	8	8

Fecha 2			
Fecha	Suma térmica	N° Hojas Liareta	N° Hojas Corcolén
24.08.2010	197,55	2	2
10.09.2010	391,55	3,6	3,8
21.09.2010	526,55	4,6	4,8
09.10.2010	749,3	6,8	7
25.10.2010	991,1	8	8

**10.4. Análisis de regresión lineal: Relación entre Número de hojas en el tallo principal y suma térmica.**

<i>Estadísticas de la regresión F1LL</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,98
R <sup>2</sup> ajustado	0,87
Error típico	0,54
Observaciones	10

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Regresión	1	246,6305994	246,6305994	829,97	2,28017E-09
Residuos	9	2,674400642	0,297155627		
Total	10	249,305			

Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad Inferior 95%	Superior 95%
---------------	--------------	---------------	---------------------------	--------------

Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
TAF F1LL	0,007427843	0,000257829	28,80921999	3,56389E-10	0,006844594	0,008011092

---

**Estadísticas de la regresión F1CC**

---

Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,88
Error típico	0,47
Observaciones	10

---

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	253,3637821	253,3637821	1161,20	6,00968E-10
Residuos	9	1,963717914	0,218190879		
Total	10	255,3275			

---

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
TAF F1CC	0,007528553	0,000220931	34,07642063	7,96283E-11	0,007028771	0,008028335

---



---

**Estadísticas de la regresión F2LL**

---

Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,74
Error típico	0,37
Observaciones	5

---

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	147,811341	147,811341	1077,61	6,21332E-05
Residuos	4	0,548659035	0,137164759		
Total	5	148,36			

---

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
TAF F2LL	0,008568351	0,000261015	32,82710667	5,13498E-06	0,007843659	0,009293044

---



---

**Estadísticas de la regresión F2CC**

---

Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,74
Error típico	0,47
Observaciones	5

---

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	153,581325	153,581325	683,59	0,000122742
Residuos	4	0,898675007	0,224668752		
Total	5	154,48			

---

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

TAF F2CC 0,008733988 0,000334052 26,1455522 1,27156E-05 0,007806509 0,009661466

**10.5. Test de paralelismo para la Tasa de aparición foliar de cada tratamiento.**

TAF	GI	tc	t <sub>0.975 (n1+n2-4)</sub>	Significancia
F1LL F1CC	16	-0,14	-2,12	ns
F1LL F2LL	11	-1,13	-2,20	ns
F1LL F2CC	11	-1,23	-2,20	ns
F1CC F2LL	11	-1,16	-2,20	ns
F1CC F2CC	11	-1,26	-2,20	ns
F2LL F2CC	6	-0,15	-2,45	ns

**10.6. Análisis de regresión lineal: Relación entre Suma térmica y Número de hojas en el tallo principal.**

**Estadísticas de la regresión F1LL PHLN**

Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,98
R <sup>2</sup> ajustado	0,87
Error típico	72,99
Observaciones	10

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Regresión	1	4422190,644	4422190,644	829,97	2,28017E-09
Residuos	9	47953,13124	5328,125693		
Total	10	4470143,775			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
PHLN F1LL	133,1843625	4,622977039	28,80921999	3,56389E-10	122,7264619	143,6422631

**Estadísticas de la regresión F1CC PHLN**

Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,88
Error típico	61,80
Observaciones	10

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P
Regresión	1	4435764,002	4435764,002	1161,20	6,00968E-10
Residuos	9	34379,77268	3819,974743		
Total	10	4470143,775			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
PHLN F1CC	131,8060726	3,86795532	34,07642063	7,96283E-11	123,0561498	140,5559954

**Estadísticas de la regresión F2LL PHLN**

Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99

R <sup>2</sup> ajustado	0,74
Error típico	43,14
Observaciones	5

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regresión	1	2005876,42	2005876,42	1077,61	6,21332E-05
Residuos	4	7445,587154	1861,396789		
Total	5	2013322,008			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
PHLN F2LL	116,2769614	3,542102038	32,82710667	5,13498E-06	106,4425096	126,1114133

#### Estadísticas de la regresión F2CC PHLN

Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,74
Error típico	54,11
Observaciones	5

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regresión	1	2001609,668	2001609,668	683,59	0,000122742
Residuos	4	11712,33927	2928,084816		
Total	5	2013322,008			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
PHLN F2CC	113,8291688	4,35367189	26,14555522	1,27156E-05	101,7414378	125,9168998

#### 10.7. Test de paralelismo para los coeficientes de filocrono de cada tratamiento

	<b>PHLN</b>	<b>GI</b>	<b>tc</b>	<b>t<sub>0,975 (n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-4)</sub></b>	<b>Significancia</b>	
	F1LL	F1CC	16	0,15	2,12	ns
	F1LL	F2LL	11	1,00	2,20	ns
	F1LL	F2CC	11	1,10	2,20	ns
	F1CC	F2LL	11	1,02	2,20	ns
	F1CC	F2CC	11	1,13	2,20	ns
	F2LL	F2CC	6	0,15	2,45	ns

## CAPÍTULO III

### III. Efecto de la fecha de siembra sobre coeficientes genéticos de trigo candeal (*Triticum turgidum* L. ssp. durum) relativos a crecimiento

#### 1. Resumen

Se realizó un estudio con el objetivo de evaluar la sensibilidad de coeficientes genéticos relativos a crecimiento de dos variedades chilenas de trigo candeal. El estudio se realizó durante la temporada 2010-2011 en la Estación Experimental Antumapu de la Universidad de Chile, bajo condiciones de riego. Las variedades evaluadas fueron Llareta INIA y Corcolén INIA en dos fechas de siembra: 19 de Mayo y 15 de Julio. Los coeficientes genéticos evaluados fueron coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa ( $k$ ) como la constante de la relación entre la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) y el índice de área foliar, eficiencia del uso de la radiación (RUE) medido a través del ciclo del cultivo como la constante de la relación entre la materia seca producida y la sumatoria de IPAR, área foliar máxima por planta ( $AF_{m\acute{a}x}$ ) como el máximo teórico de la relación entre el área foliar por planta y el número de hojas en el tallo principal, y finalmente la tasa relativa de incremento del índice de cosecha (HIGRR) como la constante de la relación entre el índice de cosecha y la edad fenológica del cultivo. Variedad y fecha de siembra no tuvieron efecto significativo sobre los coeficientes genéticos.  $k$  tuvo un valor medio de 0,47 ( $\pm 0,056$ ), RUE de 2,78 ( $\pm 0,107$ ) g MJ<sup>-1</sup>,  $AF_{m\acute{a}x}$  de 0,04 ( $\pm 0,003$ ) m<sup>2</sup> pl<sup>-1</sup> y HIGRR fue de 0,75 ( $\pm 0,081$ ).

**Palabras clave:** Coeficiente de extinción, Eficiencia del uso de la radiación, Índice de cosecha, Intercepción de radiación, Modelamiento del crecimiento de cultivos

## 2. Abstract

We conducted a research to assess the sensitivity of growth genetic coefficients of two Chilean durum wheat varieties. The study was carried out during the season 2010-2011 at “Universidad de Chile” Experimental Station Antumapu, under irrigated conditions. The evaluated varieties were Llaretta INIA and Corcolén INIA sown at: 19 May and July 15. The genetic coefficients were photosynthetically active radiation extinction coefficient ( $k$ ) as the constant of the relationship between the fraction of intercepted photosynthetically active (IPAR) and leaf area index, radiation use efficiency (RUE) measures throughout the crop cycle as the constant of the relationship between dry matter produced and the sum of IPAR, maximum leaf area per plant (AFmáx) as the theoretical maximum of the relationship between leaf area per plant and leave number on the main stem, and the relative rate of increase in harvest index (RHI) as the constant of the relationship between harvest index and the crop phenological age. Variety and sowing date had no significant effect on the genetic coefficients.  $k$  took a mean value of 0,47 ( $\pm 0,056$ ), RUE of 2,78 ( $\pm 0,107$ ) g MJ<sup>-1</sup>, AFmáx was 0,04 ( $\pm 0,003$ ) m<sup>2</sup> pl<sup>-1</sup> and HIGRR was 0,75 ( $\pm 0,081$ ).

Keywords: extinction coefficient, radiation use efficiency, harvest index, radiation interception, crop growth modeling.

### 3. Introducción

El éxito del modelamiento del crecimiento de las plantas requiere de una adecuada descripción del índice de área foliar (IAF), coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa ( $k$ ) y eficiencia en el uso de la radiación ( $RUE$ ) (O'Connell *et al.*, 2004), los que regulan los procesos de intercepción de radiación por parte de los órganos fotosintéticamente activos y conversión de la radiación interceptada a materia seca.

Con respecto a las propiedades y estructura de la canopia, Watson introdujo en 1947, el concepto de índice de área foliar, definiéndolo como el área de las hojas de una población de plantas dividida por el área de terreno que estas ocupan. El desarrollo del IAF involucra procesos tales como la aparición de nuevas hojas, la expansión de estas y la senescencia de hojas (Soltani *et al.*, 2006). El coeficiente de extinción de PAR ( $k$ ) depende del ángulo de elevación solar, de la distribución de ángulos foliares, la transmitancia de la canopia y la distribución de las hojas (Villalobos *et al.*, 2002). Este toma la forma de una constante en la Ley de Beer-Lambert adaptada por Monsi y Saeki (1953) para la extinción de radiación a través de la cobertura del cultivo. La relación se ajusta bastante bien en canopias continuas donde la distribución foliar es al azar, como ocurre en cultivos extensivos.

Al relacionar la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la canopia del cultivo y la biomasa de este, esta resulta ser lineal y de pendiente positiva (Albrizio y Steduto, 2005; Kemanian *et al.*, 2004; Calderini *et al.*, 1997; Del Pozo, 1988). La pendiente es un coeficiente de eficiencia cuya interpretación es la capacidad del cultivo de producir una cierta cantidad de materia seca por unidad de energía radiante interceptada o absorbida, esta es la eficiencia del uso de la radiación ( $RUE$ ) a nivel de cultivo. Entre los primeros investigadores que confirmaron la naturaleza conservativa de la eficiencia del uso de la radiación en cereales fueron Gallagher y Biscoe (1978) y el concepto ha sido aplicado a diversas especies vegetales y dada esta característica es que ha sido ampliamente usada en modelamiento de cultivos para la estimación de producción de biomasa.

Con respecto a la simulación del rendimiento, muchos modelos lo estiman mediante el número de granos por unidad de área (Ritchie *et al.*, 1998), mientras que otros

modelos usan coeficientes de reparto a grano (Goudriaan y van Laar, 1994). Porter *et al.*, (1993) puso de manifiesto que la simulación de la cantidad de granos por unidad de superficie induce errores importantes, proponiendo un modelo de incremento del índice de cosecha de tipo lineal. Para que estos modelos tengan éxito es necesario estimar 3 parámetros: el periodo donde el índice de cosecha se incrementa de forma lineal, el momento en que este incremento cesa, y la tasa con que el índice de cosecha se incrementa (Soltani *et al.*, 2004).

Como ya fue mencionado, estos coeficiente son utilizados como parámetros de entrada en modelos de cultivos, bajo el nombre de coeficientes genéticos, los cuales son característicos del genotipo y deben cumplir con la condiciones de tener una baja interacción con el medio ambiente (Sinclair y Muchow, 1999; Reynolds *et al.*, 2000; Kemanian *et al.*, 2004). Estos han sido establecidos en condiciones experimentales no estresantes para trigo (Pozo, 1988; Takahashi y Nakaseko, 1990; Gregory *et al.*, 1992), no obstante en trigo candeal, el cual puede representar un cultivo estratégico en la agricultura chilena, la información es bastante limitada, particularmente respecto de las variedades chilenas.

#### **4. Hipótesis**

Los coeficientes genéticos de trigo candeal variedades Llaretta INIA y Corcolén INIA relativos a crecimiento no varían en función de la fecha de siembra.

#### **5. Objetivos**

##### **5.1. Objetivo general**

Determinar y evaluar la sensibilidad de los coeficientes genéticos relacionados con el crecimiento de las variedades Llaretta y Corcolén INIA en dos fechas de siembra.

##### **5.2. Objetivos específicos**

Para ambas fechas de siembra y variedades determinar el coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa ( $k$ ), la eficiencia en el uso de la radiación (RUE), área foliar máxima por planta (AF<sub>máx</sub>) a través de la relación entre el número de hojas y el área foliar y la tasa relativa de crecimiento del índice de cosecha (HIGRR).

## 6. Materiales y Métodos

### 6.1. Ubicación del experimento y condición edafoclimática

El experimento fue realizado en la Estación Experimental Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Región Metropolitana, Chile (33°40´m latitud sur, 70°38´ longitud oeste y 605 m.s.n.m.).

Antumapu se encuentra en una zona de clima templado mesotermal estenotermico mediterráneo semiárido. Las temperaturas anuales varían entre una máxima promedio de 29°C en Enero, y una mínima también promedio de 2,8°C en Julio. Además, tiene 1.528 días-grados /base 10°C) por año, 1.232 horas frío calculadas por año y una precipitación media anual de 369,5 mm (INIA, 1989).

El suelo está incluido en la Serie Santiago (CIREN, 1996), de origen aluvial, ligeramente profundo, con topografía plana, con o sin microrelieve, en posición de gran cono aluvial. Con textura franco arenosa fina en superficie.

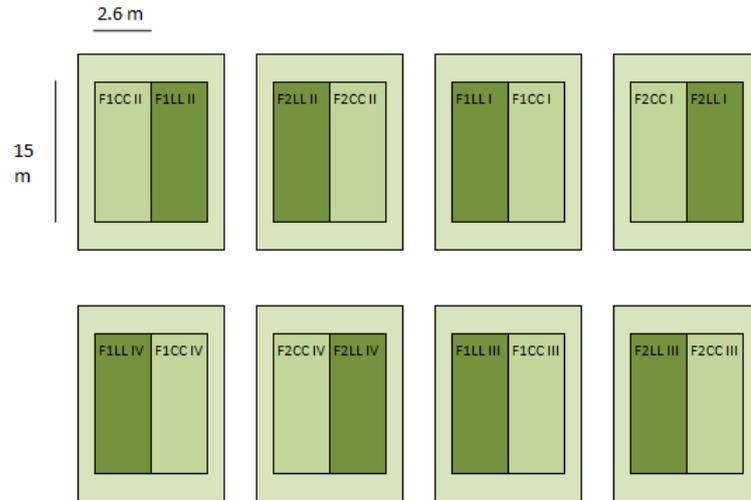
### 6.2. Diseño del experimento y labores culturales

En el Cuadro 2 se observan los 4 tratamientos constituidos por los factores fecha de siembra y variedad con 2 niveles cada uno.

**Cuadro 1.III:** Composición de los tratamientos

Tratamiento	Fecha de siembra	Variedad
F1LL	19.05.2010	Llaretta
F1CC	19.05.2010	Corcolén
F2LL	15.07.2010	Llaretta
F2CC	15.07.2010	Corcolén

El diseño experimental correspondió a Parcelas divididas en bloques completos al azar, con 4 repeticiones y estructura factorial de tratamientos (2x2). La parcela principal correspondió a la fecha de siembra y la variedad de trigo candeal estuvo en la sub-parcela (Figura 1.III). La unidad experimental quedó definida como una sub-parcela de 15 m de largo y 2,6 m de ancho



**Figura 1.III:** Distribución de los tratamientos en campo. F1: Fecha de siembra 19.05.2010, F2: Fecha de siembra 15.07.2010, C: Variedad Corcolén INIA y LL: Variedad Llareta INIA.

El trigo candeal fue sembrado de forma mecanizada, con una distancia entre hilera de 20 cm y una dosis de 150 kg ha<sup>-1</sup> de semilla, en un suelo previamente arado y rastreado.

La dosis de fertilización nitrogenada fue de 160 Kg N ha<sup>-1</sup> en forma de urea (46-0-0), calculada en base a la demanda de un cultivo de trigo candeal con un rendimiento esperado de 7 Mg ha<sup>-1</sup>. Se parcializó 1/3 a la siembra y 2/3 al estado de primer nudo. Se realizó un análisis químico de suelos previo a la siembra del cultivo para definir los requerimientos de fósforo y potasio, resultando en dosis de 120 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> a la siembra en forma de superfosfato triple (0-48-0) y 0 kg de K<sub>2</sub>O.

Se procedió al control de plagas, enfermedades y malezas de manera de asegurar un crecimiento óptimo.

El experimento fue realizado bajo condiciones de riego, considerando un umbral de riego del 50% de la humedad aprovechable. El contenido de agua del suelo fue monitoreado periódicamente mediante el uso de FDR (Diviner 2000).

### **6.3. Mediciones**

#### **6.3.1. Seguimiento del estado de desarrollo del cultivo**

El estado de desarrollo del cultivo se determinó en base a la escala decimal Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974) dos veces por semana, considerando finalizada cada fase cuando el 50% de las plantas que constituyen la unidad experimental se encontraron en ella.

#### **6.3.2. Establecimiento del cultivo**

El establecimiento del cultivo fue evaluado al estado de 2 hojas (Zadoks 1,2), mediante el conteo del número de plantas por metro lineal, repitiendo el proceso 4 veces por unidad experimental. Cada lugar donde se realizó conteo fue seleccionado al azar. Con la información de plantas por metro lineal y distancia entre hilera se determinó la densidad de plantas (DP; plantas m<sup>-2</sup>).

#### **6.3.3. Fitomasa aérea**

Se tomaron muestras de plantas constituidas por 2 hileras de 50 cm en cada unidad experimental, se manera de determinar la evolución de la materia seca aérea del cultivo durante su ciclo. La frecuencia de muestreo fue de dos semanas entre emergencia y hoja bandera -1 y de una semana entre hoja bandera -1 y madurez fisiológica. A partir de cada muestra se estimaron las siguientes variables:

##### **6.3.3.1. Índice de Área Foliar**

De cada muestra se tomaron 5 plantas al azar, a las cuales se les extrajo la totalidad de sus hojas, las cuales fueron escaneadas para obtener imágenes digitales que posteriormente fueron procesadas mediante el programa Adobe Photoshop CS3 para obtener el área foliar de cada planta mediante el método propuesto por Sandrini *et al.* (2007). El índice de área foliar fue determinado como sigue:

$$IAF = AFP DP \quad [1.III]$$

Donde  $IAF$  es el índice de área foliar,  $AFP$  es el área foliar por planta ( $m^2\ pl^{-1}$ ) y  $DP$  la densidad de plantas.

### 6.3.3.2. Número de hojas en el tallo principal

En las mismas 5 plantas tomadas para estimar  $IAF$ , se contó el número de hojas del tallo principal.

### 6.3.3.3. Acumulación de materia seca

Una vez definidas las variables anteriores, las muestras completas, incluidas las 5 plantas mencionadas, se secaron en estufa a  $70^\circ C$  hasta peso constante. Posteriormente fueron pesadas para determinar la materia seca acumulada hasta ese momento.

### 6.3.4. Intercepción de radiación

En paralelo a la evaluación de materia seca aérea, se midió la radiación fotosintéticamente activa incidente sobre el cultivo y transmitida por el cultivo al suelo mediante el uso de un sensor lineal de radiación (Ceptómetro Lineal Delta T Devices®, modelo SS1, UK), de manera de determinar la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo, mediante la siguiente relación:

$$fIPAR = \frac{(PAR_o - PAR_s)}{PAR_o} \quad [2.III]$$

Donde  $fIPAR$  representa la fracción de  $PAR$  interceptada por la cubierta del cultivo,  $PAR_o$  es la  $PAR$  incidente sobre el cultivo y  $PAR_s$  la  $PAR$  transmitida al suelo.

Se midió  $PAR_o$  sobre el cultivo y luego para medir la  $PAR_s$  el ceptómetro fue ubicado a nivel de suelo en posición diagonal entre dos hileras, esta medición se realizó dos veces por unidad experimental y luego se volvía a medir  $PAR_o$ .

De manera de lograr valores representativos de  $fIPAR$  diario, las mediciones se realizaron durante el horario de invierno las mediciones fueron realizadas a las

10:30, 12:30 y 16:30 horas. Durante el horario de verano las mediciones se realizaron a las 11:30, 13:30 y 17:30 horas. Además, las mediciones se llevaron a cabo solo si el día estaba completamente despejado o completamente nublado. Los valores de intercepción obtenidos a diferentes horas fueron promediados.

### **6.3.5. Incremento del índice de cosecha**

Desde antes se midió la materia seca de granos utilizando la muestra obtenida para fitomasa aérea. El índice de cosecha fue determinado en base a la siguiente relación:

$$IC_t = \frac{MSg_t}{MSa_t} \quad [3. III]$$

Donde  $IC_t$  es el índice de cosecha al tiempo t,  $MSg_t$  es la materia seca de granos (g) al tiempo t y  $MSa_t$  es la materia seca aérea total (g) al tiempo t.

### **6.3.6. Rendimiento**

Se cosechó 2 m<sup>2</sup> de fitomasa aérea en cada unidad experimental a ras de suelo, de cada metro cuadrado (manejo) se extrajeron 50 espigas con sus respectivos tallos, los que fueron pesados en húmedo y posteriormente fueron llevadas a estufa de secado a 70°C hasta 0% de humedad, pesadas nuevamente y calculado el porcentaje de agua. Cada manejo fue trillado y del grano obtenido se extrajeron 250 granos, a los cuales se les calculó el contenido de agua tal como en el caso anterior. De los datos obtenidos se estimaron los componentes de rendimiento tales como peso seco de 1000 granos, espigas por m<sup>2</sup>, granos por m<sup>2</sup>, granos por espiga, y fue obtenido el rendimiento, biomasa e índice de cosecha.

## **6.4. Estimaciones**

### **6.4.1. Suma térmica**

Se registró la suma térmica desde emergencia hasta madurez fisiológica. Para ello se utilizó las temperaturas medias diarias de la temporada de estudio y fue

considerada una temperatura base constante durante el ciclo del cultivo de 0°C (Amir y Sinclair, 1991; Baker *et al.*, 1986; Kirby, 1985), la ecuación utilizada corresponde a la planteada por De Candolle (1855):

$$ST = \sum_{i=t_i}^{t_f} (TMD_i - T_b) \quad [4.III]$$

si  $ST < 0$  entonces  $ST = 0$

Donde  $ST$  es el suma térmica (°C día),  $TMD$  es la temperatura media (°C) y  $T_b$  es la temperatura base de desarrollo del cultivo (°C).

#### 6.4.2. Área foliar máxima por planta

Mediante análisis de regresión se determinó la relación entre el número de hojas del tallo principal y el área foliar por planta. La función de ajuste utilizada para este fin fue la siguiente:

$$AFP = \frac{AFP_{m\acute{a}x}}{1 + b e^{-cNHTP}} \quad [5.III]$$

Donde  $AFP$  es el área foliar por planta ( $m^2 \text{ pl}^{-1}$ ),  $NHTP$  es el número de hojas del tallo principal,  $AFP_{m\acute{a}x}$  representa el valor máximo que puede tomar el área foliar de cada planta. Los coeficientes  $b$  y  $c$  son parámetros de regresión.

#### 6.4.3. Coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa

El coeficiente de extinción fue determinado por medio de análisis de regresión relacionando la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada y el índice de área foliar. El coeficiente de extinción PAR es la constante en la Ley de Beer-Lambert adaptada por Monsi y Saeki (1953) para la extinción de radiación a través de la cobertura del cultivo:

$$fIPAR_t = 1 - e^{-k IAF_t} \quad [6.III]$$

Donde  $fIPAR_t$  es la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo al tiempo  $t$ ,  $k$  es el coeficiente de extinción de  $PAR$  e  $IAF_t$  es el índice de área foliar del cultivo al tiempo  $t$ .

#### 6.4.4. Radiación fotosintéticamente activa interceptada

Fue calculada a partir de la ecuación 7, que involucra el índice de área foliar en función del tiempo y la radiación solar global registrada diariamente.

$$IPAR_t = 1 - e^{(-kIAF_t)} RSG_t 0,5 \quad [7]$$

Donde  $IPAR_t$  es la radiación fotosintéticamente activa interceptada al tiempo  $t$ ,  $k$  es el coeficiente de extinción de  $PAR$  (constante),  $IAF_t$  es el índice de área foliar al tiempo  $t$  y  $RSG_t$  es la radiación solar global incidente al tiempo  $t$ .

Se consideró que el 50% de la radiación solar global corresponde a radiación fotosintéticamente activa (Takahashi y Nakaseco, 1990).

#### 6.4.5. Eficiencia de uso de la radiación PAR interceptada en la producción de materia seca

Su valor fue estimado mediante la pendiente de la regresión lineal realizada entre los valores de acumulación de biomasa aérea y acumulación de PAR interceptada por el cultivo, representada por la siguiente función:

$$B = RUE \sum_{i=ti}^{tf} IPAR_i + b \quad [8.III]$$

Donde  $B$  es la fitomasa aérea acumulada al tiempo  $t$ ,  $RUE$  es la eficiencia en el uso de la radiación,  $IPAR_t$  es la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo al tiempo  $t$  y  $b$  es un parámetro de regresión que indica la fitomasa aérea cuando la radiación fotosintéticamente interceptada es igual a 0.

#### 6.4.6. Tasa relativa de incremento del índice de cosecha

Dadas las diferencias observadas en la suma térmica desde antesis a madurez fisiológica entre fechas de siembra, se procedió a normalizar este periodo en términos de edad fenológica, definida como:

$$EDf_t = \frac{ST_t}{ST_{max}} \quad [9.III]$$

Donde  $EDf_t$  es la edad fenológica al tiempo  $t$ ,  $ST_t$  es la suma térmica al tiempo  $t$  y  $ST_{max}$  es la suma térmica requerida para completar el ciclo de desarrollo del cultivo. Su valor fue representado por la pendiente de la relación lineal existente entre el índice de cosecha, definido como la relación entre la materia seca de grano y la materia seca de la fitomasa aérea total, y la  $EDf$  del cultivo:

$$IC = HIGRR EDf + b \quad [10.III]$$

Donde  $IC$  es el índice de cosecha,  $HIGRR$  es la tasa relativa de incremento del  $IC$ ,  $EDf$  es la edad fenológica del cultivo y  $b$  es un parámetro de regresión que representa el  $IC$  cuando la suma térmica es igual a 0.

#### 6.5. Información meteorológica

La temperatura media y radiación solar diaria, fueron obtenidas a partir de una estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental La Platina del INIA ubicada a 500 m del lugar del ensayo.

#### 6.6. Análisis estadístico

La estimación de las rectas de regresión se realizó mediante el método de mínimos cuadrados (Steel y Torrie, 1985). Cuando los datos no se ajustaron a una regresión lineal, la regresión se estimó mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963). En ambos casos se utilizó el programa Statgraphics Centurion XV Versión 15.2.06. La estimación de los parámetros iniciales en el caso funciones

no lineales, necesarios para el desempeño eficiente del programa, se realizó por medio del complemento Solver del programa Microsoft® Office Excel®.

Las funciones de regresión obtenidas para ambas variedades y fechas de siembra fueron sometidas a un test de paralelismo mediante una prueba de hipótesis bilateral de tipo  $t$  de Student para identificar diferencias significativas entre sus coeficientes.

$$t = \frac{b_0 - b_1}{\sqrt{S^2 \frac{1}{SC_{x1}} + \frac{1}{SC_{x2}}}} \sim t_{n_0+n_1-4} \quad [11.III]$$

Donde  $b$  corresponde a los parámetros de regresión a comparar,  $S^2$  es la varianza ponderada,  $SC_x$  la suma de cuadrados de  $x$  y  $n$  el número de observaciones que compone cada regresión.  $S^2$  fue calculada como sigue:

$$S^2 = \frac{SC_{residual\ 0} + SC_{residual\ 1}}{n_0 + n_1 - 4} \quad [11.1.III]$$

Donde  $SC_{residual}$  es la suma de cuadrados de los residuales del análisis de regresión. La suma de cuadrados de  $x$  fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$SC_x = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad [11.2.III]$$

En el caso de la regresión entre el área foliar por planta y número de hojas en el tallo principal, cuya función no era susceptible de ser linearizada, se compararon los intervalos de confianza (95%) de los parámetros involucrados.

## 7. Resultados y Discusión

### 7.1. Coeficientes asociados a la canopia del cultivo

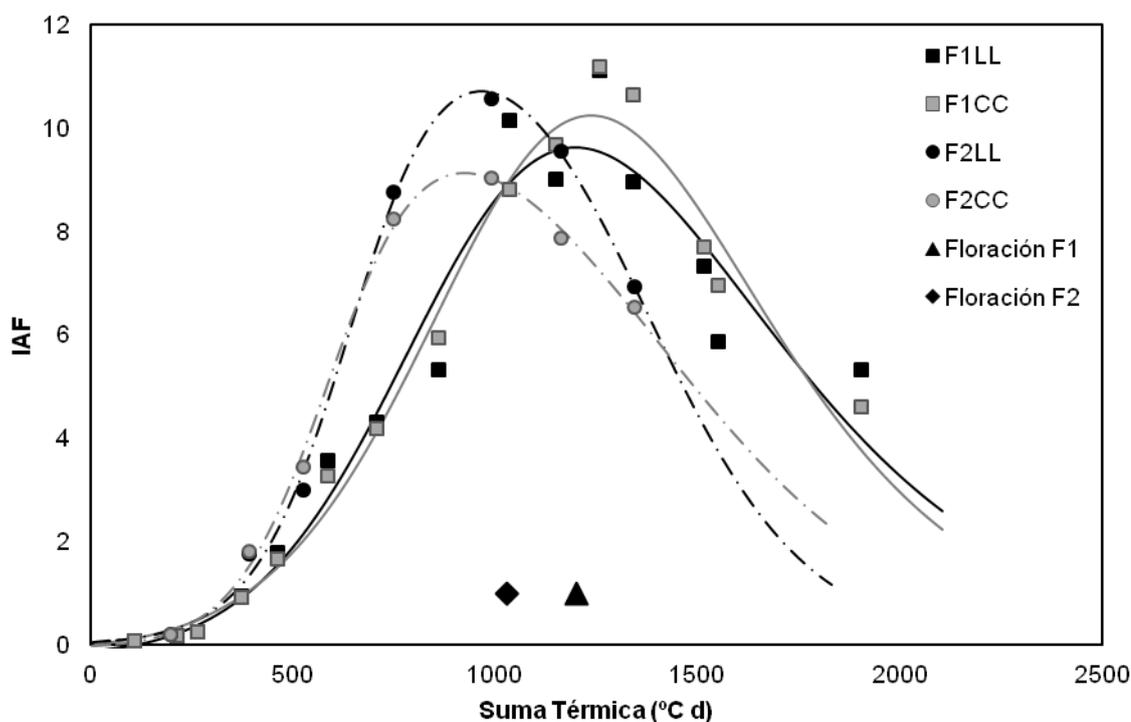
Para que el modelamiento del crecimiento de las plantas sea exitoso, se requiere una adecuada descripción de la evolución del índice de área foliar, y valores precisos del coeficiente de extinción IPAR y RUE (O'Connell et al., 2004).

#### 7.1.1. Evolución del Índice de Área Foliar

La Fig. 2.III muestra la evolución temporal del IAF de trigo candeal para dos fechas de siembra en función del tiempo térmico desde emergencia. Los datos muestrales se ajustaron a dos funciones sigmoideas (Ecuación 13), la primera de ellas creciente, lento en un comienzo hasta el periodo cercano a encañado, para luego crecer con una alta tasa hasta el periodo entre embuche y antesis, llegando a un máximo, para luego descender en forma de una sigmoidea decreciente.

$$IAF = \frac{a}{1 + e^{(-bTT-c)}} - \frac{a}{1 + e^{(-dTT-e)}} \quad [13]$$

El área foliar es determinada por diversos factores, tal como la fenología, la tasa de aparición foliar, el tamaño potencial de la hoja y la morfología del tallo, y cualquier efecto de déficit hídrico afectará los factores mencionados disminuyendo el área foliar (Blum, 1996), por lo que era de esperar que bajo condiciones de riego y libre de estrés biótico se alcanzaran valores altos.



**Figura 2.III:** Regresión entre el índice de área foliar y la Suma Térmica desde emergencia del cultivo de trigo candeal. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

Los valores máximos de índice de área foliar registrados en el presente estudio superan a 9 en todos los tratamientos, valores bastante altos respecto de los IAF máximos documentados por Royo *et al.* (2004), quienes en Lleida, España, bajo condiciones de riego, evaluaron 25 genotipos de trigo candeal con una densidad de siembra alta, 550 semillas viables por m<sup>2</sup> logrando valores máximos de IAF en el primer año de 3,52 y 5,45 en el segundo. Albrizio y Steduto (2005) también registraron valores máximos de IAF de 3 en trigo candeal regado en la localidad de Velenzano, Italia.

Kara y Mujdeci (2010) trabajando con trigo harinero bajo condiciones de secano en Turquía con tres variedades invernales, informaron IAF máximos medios de 9 en espigadura. Independiente del hecho que el trigo invernal tenga un rendimiento potencial mayor que el del candeal (Koppel y Ingver, 2008), es claro que la generación de IAF está fuertemente ligada al medio ambiente que define el largo de ciclo del cultivo y por ende el potencial de generación de IAF. Pese a la diferencia en magnitud, la dinámica de crecimiento tiende a mantenerse.

En el Cuadro 2.III se observan los parámetros de regresión correspondientes a la Ecuación [12] para cada variedad y fecha de siembra. El tiempo térmico acumulado explicó entre un 92,06 y un 98,96% de la variación observada en el IAF durante la temporada de crecimiento, observándose un muy buen ajuste.

**Cuadro 2.III:** Parámetros de regresión de las funciones de evolución del IAF respecto de tiempo térmico para ambas variedades y fechas de siembra.

Parámetro	a	b	c	d	e	n	R <sup>2</sup> ajustado
<i>Primera fecha de siembra</i>							
Llaretá	24,3	4,3 10 <sup>-3</sup>	851,5	2,6 10 <sup>-3</sup>	1319,9	15	92,1
Corcolén	81,3	3,6 10 <sup>-3</sup>	1034,1	3,2 10 <sup>-3</sup>	1173,7	15	97,3
<i>Segunda fecha de siembra</i>							
Llaretá	13,1	8,3 10 <sup>-3</sup>	646,9	5,0 10 <sup>-3</sup>	1371,1	7	99,0
Corcolén	12,0	8,2 10 <sup>-3</sup>	593,9	3,3 10 <sup>-3</sup>	1391,4	7	99,0

n representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

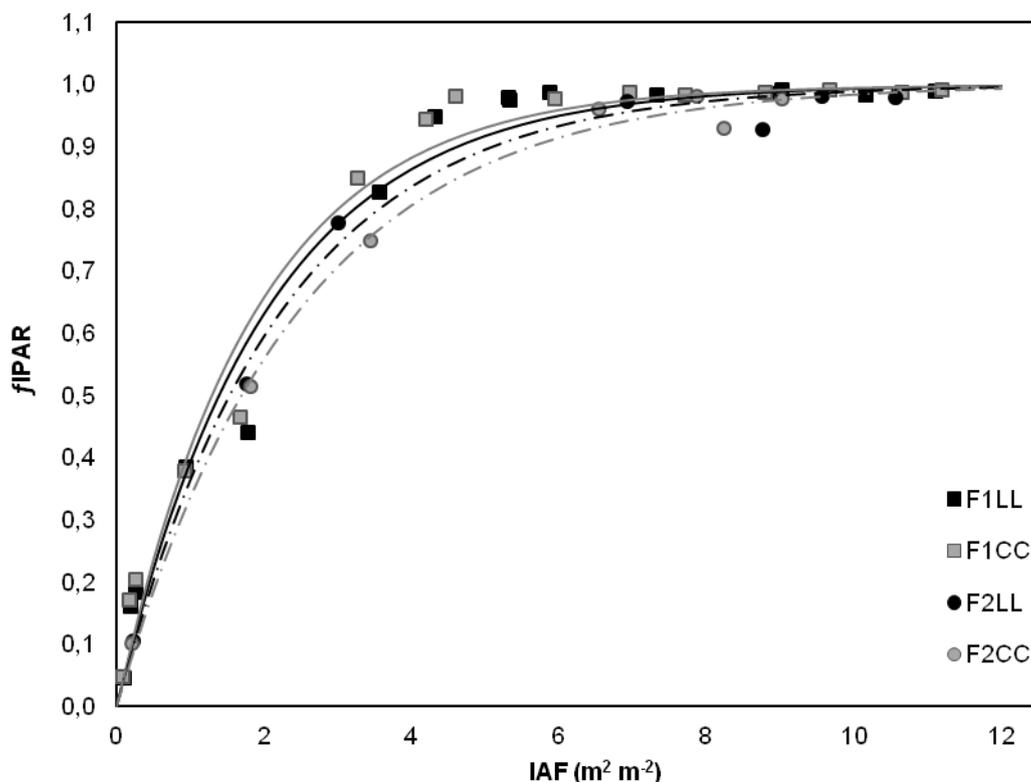
A partir de los modelos ajustados para la evolución del IAF, se generaron los datos necesarios para la estimación del coeficiente de extinción PAR y la IPAR por el cultivo durante la temporada, y finalmente la eficiencia del uso de la radiación.

### 7.1.2. Intercepción de radiación fotosintéticamente activa y Eficiencia de uso de la PAR interceptada

La Figura 3.III muestra la relación entre el IAF y la fracción de PAR interceptada por el cultivo ajustada a la Ley de Beer Lambert adaptada por Monsi y Saeki (1953).

Ambas variedades y ambas fechas de siembra con una población de plantas promedio de 240 plantas m<sup>-2</sup>, fueron capaces de lograr una interceptación de radiación equivalente al 95% de la IPAR (IAF crítico). Los valores de índice de área foliar críticos fluctuaron entre 5,6 y 7,3 para F1CC y F2CC respectivamente, mientras que los IAF críticos para Llaretá INIA en ambas fechas de siembra tuvieron valores intermedios. El hecho de que F1CC fuera más eficiente en interceptar radiación guarda relación con su coeficiente de extinción PAR, el que tendió a ser mayor al de los otros tratamientos, por lo tanto la arquitectura de sus hojas tendió a ser menos erecta interceptando mayor cantidad de radiación alrededor del medio día que los

tratamientos con  $k$  más bajos, no obstante la fecha de siembra y la variedad no tuvieron un efecto significativo sobre  $k$  (Cuadro 3.III).



**Figura 3.III:** Regresión entre la fracción de PAR interceptada diaria y el índice de área foliar durante el ciclo del cultivo de trigo candeal. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

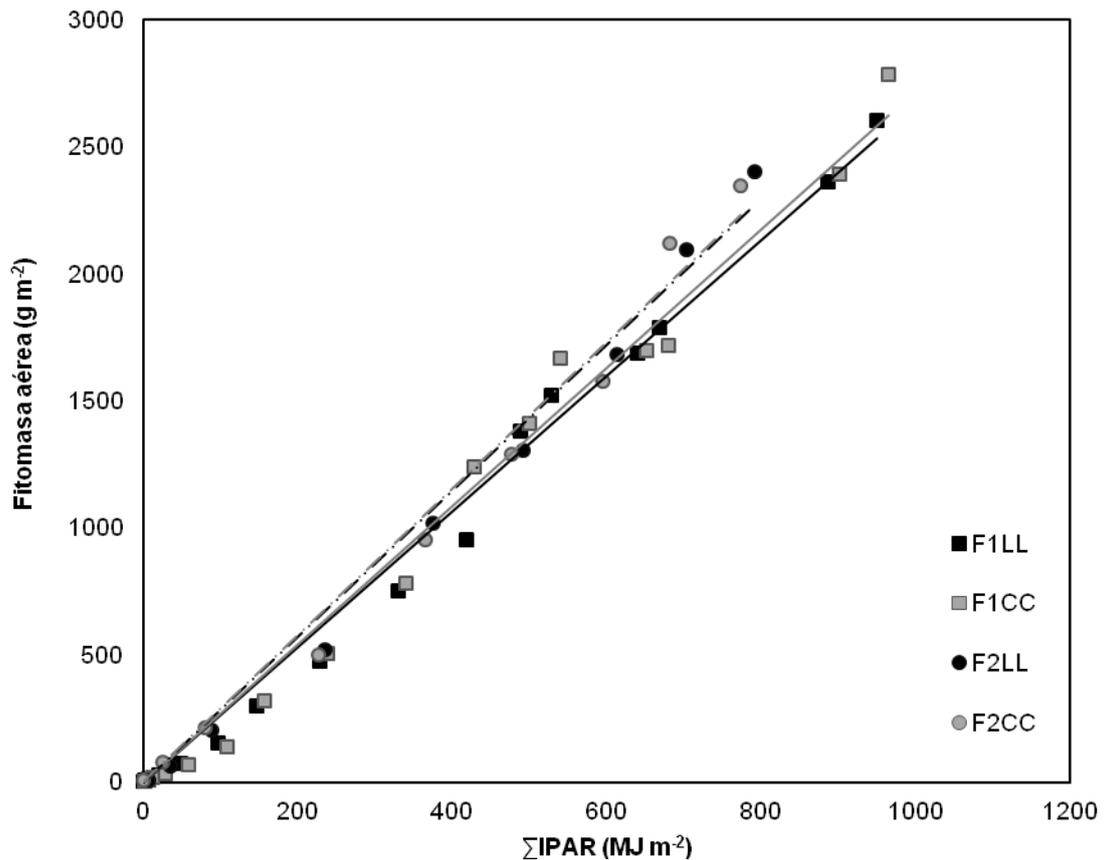
**Cuadro 3.III:** Coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa ( $k$ ) para ambas variedades y fechas de siembra.

Tratamiento	$k^a$	n	$R^2$ ajustado %
F1LL	0,498 a	15	97,73
F1CC	0,536 a	15	98,01
F2LL	0,451 a	7	99,17
F2CC	0,408 a	7	99,52

<sup>a</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no tienen diferencias significativas de acuerdo a una prueba  $t$  ( $p \leq 0,05$ ).  $n$  representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y  $R^2$  es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

Román (2009) identificó diferencias significativas entre las variedades Llaretta y Corcolén INIA para este coeficiente, obteniendo valores de 0,511 y 0,438 respectivamente, similares a los obtenidos en este estudio. Además de la concordancia en los valores de  $k$ , en el estudio de Román (2009) para lograr una intercepción cercana al 95% de la radiación incidente, se requirió un valor de IAF promedio de 6. O'Connell *et al.* (2004) evaluó el  $k$  en el periodo pre anthesis de trigo obteniendo valores de  $0,82 \pm 0,05$ , bastante mayor al obtenido en esta investigación que consideró el ciclo completo. Esto coincide con lo observado por Takahashi and Nakaseko (1990), quienes estimaron el  $k$  en diferentes fases de desarrollo de trigo primaveral y su variación durante la estación, observando una disminución del coeficiente desde 0,6 cerca de encañado hasta estabilizarse en un valor cercano a 0,3 en espigadura.

La Figura 4.III muestra la relación lineal entre la acumulación de radiación fotosintéticamente interceptada ( $\Sigma$ IPAR) y la fitomasa aérea acumulada por el cultivo durante su ciclo desde emergencia hasta madurez fisiológica, cuya pendiente representa la eficiencia de uso de la radiación (RUE) del cultivo en una escala estacional. En cada una de las regresiones el intercepto con las ordenadas resultó ser estadísticamente igual a cero ( $p \geq 0,05$ ), por lo que cada regresión fue forzada a cruzar por el origen. Todas las regresiones resultaron ser significativas. La variación observada en la biomasa es explicada entre un 87 y un 93% por la  $\Sigma$ IPAR.



**Figura 4.III:** Regresión entre la fitomasa aérea acumulada y la PAR interceptada acumulada por la canopia del cultivo de trigo candeal. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

La estabilidad de la RUE potencial a lo largo de la temporada en un medio ambiente y especie dada ha sido ampliamente documentada en distintas especies tal como trigo (O'Connell *et al.*, 2004), Cebada (Kemanian *et al.*, 2004) y trigo candeal (Albrizio y Steduto, 2005), por lo que los resultados obtenidos son consecuentes. No obstante, Román (2009) estudiando las mismas variedades de trigo candeal de este estudio informó una caída en el valor de RUE luego de antesis, y lo atribuyó a un sombreadamiento excesivo y senescencia posterior a la antesis, además de la producción de componentes altamente energéticos como ácidos grasos.

**Cuadro 4.III:** Eficiencia del uso de la radiación fotosintéticamente activa interceptada para ambas fechas de siembra y variedades.

<b>Tratamiento</b>	<b>RUE<sup>a</sup> g MJ<sup>-1</sup></b>	<b>n</b> -	<b>R<sup>2</sup><sub>ajustado</sub></b> %
F1LL	2,66 a	19	92,89
F1CC	2,72 a	19	92,63
F2LL	2,86 a	9	87,06
F2CC	2,88 a	9	86,87

<sup>a</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no tienen diferencias significativas de acuerdo a una prueba t ( $p \leq 0,05$ ). n representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

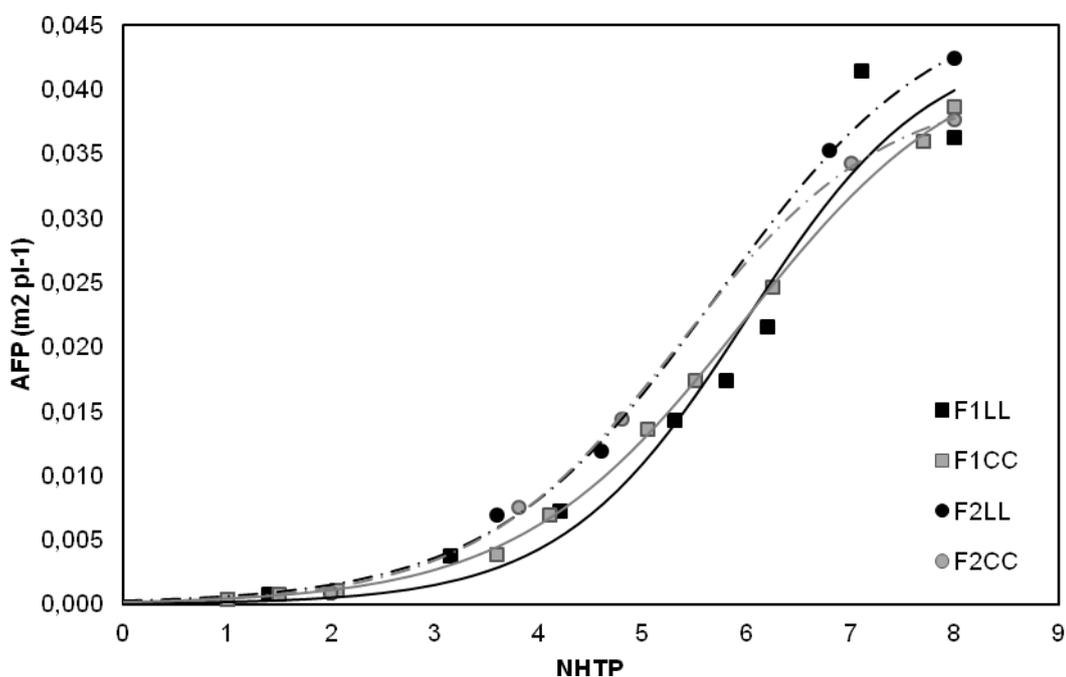
Fecha de siembra y variedad no resultaron tener un efecto significativo sobre RUE (Cuadro 4.III). Los valores obtenidos son bastante menores a los registrados por Albrizio y Steduto (2005) para la variedad Appulo de trigo candeal bajo condiciones de riego, llegando a una RUE en base a radiación global interceptada de 1,7 g MJ<sup>-1</sup>, aproximadamente 3,4 g MJ<sup>-1</sup> en base IPAR. Por otro lado O'Connell et al. (2004) en una experiencia con trigo en Australia, pero bajo condiciones de secano, logró RUE del orden de 1,81 g MJ<sup>-1</sup> en base IPAR, demostrando la sensibilidad de este coeficiente genético a estrés ambiental. En ambos casos la linealidad de la relación se mantuvo durante todo el periodo de crecimiento del cultivo. Román (2009), registró valores de RUE en base a IPAR para Llaretta INIA y Corcolén INIA de 2,96 y 2,86 g MJ<sup>-1</sup> para el ciclo completo, muy similares a los obtenidos en el presente trabajo.

La constancia de la RUE durante el ciclo del cultivo y entre fechas de siembra demuestra que es un rasgo conservado bajo condiciones no estresantes, tal como indicaron Gallagher y Biscoe (1978). Además constituye una herramienta útil para modelar la acumulación de biomasa en base al modelo general representado por la ecuación [8].

## 7.2. Crecimiento del área foliar y área foliar máxima por planta

En la Figura 5.III se muestra la evolución del área foliar por planta (AFP) en función del número de hojas en el tallo principal.

El aumento acelerado comienza aproximadamente desde cuarta hoja, lo que en términos de suma térmica coincide con el estado fenológico de primer nudo, donde comienza la elongación del tallo principal y el aumento exponencial del IAF, hasta detenerse al terminar la expansión de la hoja bandera, lo que ocurre entre los estados de embuche y antesis (Figura 2.III).



**Figura 5.III:** Regresión entre el área foliar por planta y número de hojas en el tallo principal durante el ciclo del cultivo de trigo candeal. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

El cuadro III.5 muestra los parámetros de la regresión antes mencionada (Ecuación 11). Ninguno de los parámetros resultó ser estadísticamente diferente, por lo que para la condición dada, las variedades presentan una dinámica de crecimiento similar, y la fecha de siembra no tiene efecto sobre esta relación. El número de hojas en el tallo principal explicó entre un 94,28 y un 99,85% de la variación total observada en el AFP.

**Cuadro 5.III:** Área foliar máxima por planta (AFmáx) y parámetros de regresión de la relación entre el número de hojas del tallo principal y el área foliar por planta.

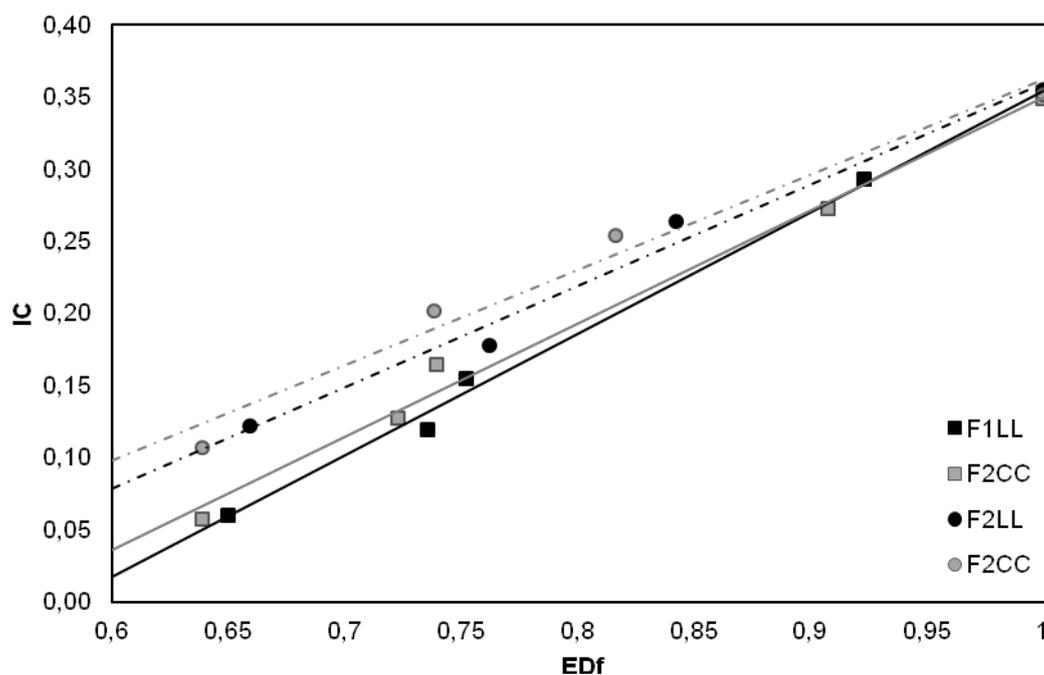
Tratamiento	AFmáx <sup>b</sup> m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup>	b <sup>b</sup> -	c <sup>b</sup> -	n -	R <sup>2</sup> <sub>ajustado</sub> %
F1LL	0,0441 a	827,25 a	1,12 a	10	94,28
F1CC	0,0439 a	241,76 a	0,91 a	10	99,91
F2LL	0,0476 a	198,88 a	0,92 a	5	99,70
F2CC	0,0403 a	223,87 a	1,01 a	5	99,85

<sup>b</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no son diferentes en función del análisis de sus intervalos de confianza al 95%. n representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

En un estudio previo, Román (2009) definió el área foliar máxima para Llaretá y Corcolén, obteniendo valores de 0,0277 y 0,0254 m<sup>2</sup> pl<sup>-1</sup> respectivamente, siendo estos valores muy inferiores respecto a los obtenidos en este estudio, no obstante la dinámica de crecimiento en términos de momento de crecimiento acelerado se conserva. En este caso no solo en máximo teórico (AFmáx) fue diferente, sino que también los coeficientes b y c que representan parámetros de amplitud y concavidad de la curva, por lo que esta relación, al parecer, es una de las más sensibles a cambios en el medio ambiente.

### 7.3. Tasa relativa de incremento del índice de cosecha

La Fig. 6.III muestra la relación establecida entre la EDf<sub>t</sub> y el índice de cosecha para ambas variedades en ambas fechas de siembra. Todas las regresiones resultaron ser significativas. El avance en la edad fenológica del cultivo explicó entre un 97 y un 99% de la variación observada en el IC. La pendiente de la relación lineal representa la tasa de incremento del índice de cosecha relativo (HIGRR).



**Figura 6.III:** Regresión entre el índice de cosecha del cultivo de trigo candeal y la edad fenológica del cultivo. Línea negra F1LL, Línea gris F1CC, línea negra discontinua F2LL y línea gris discontinua F2CC.

**Cuadro 6.III:** Tasa relativa de incremento del índice de Cosecha (HIGRR) para ambas variedades y fechas de siembra.

Tratamiento	HIGRR <sup>a</sup>	Intercepto <sup>a</sup>	n	R <sup>2</sup> ajustado %
F1LL	0,840 a	-0,487 a	5	99,39
F1CC	0,783 a	-0,434 a	5	97,95
F2LL	0,701 a	-0,342 a	4	96,52
F2CC	0,660 a	-0,298 a	4	98,74

<sup>a</sup> Valores en la columna seguidas por la misma letra no tienen diferencias significativas de acuerdo a una prueba t ( $p \leq 0,05$ ). n representa el número de observaciones utilizadas en la regresión y R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación ajustado por los grados de libertad de la regresión.

Variedad y fecha de siembra no afectaron el HIGRR.

Al realizar las regresiones con los valores de tiempo térmico acumulados absolutos, los valores de tasa de incremento del índice de cosecha (HIGRR) no mostraron diferencias significativas entre sí, logrando un valor promedio de 0,000457 °C<sup>-1</sup>, es

decir, por cada unidad de tiempo térmico sumada desde antesis, el IC aumentaba 0,0457% (Datos no mostrados).

Moot *et al.*, (1996) observaron en trigo un incremento lineal del índice de cosecha en la etapa de llenado de grano, cuya tasa se mantuvo relativamente estable bajo diversas condiciones de crecimiento, como diferentes fechas de siembra, tratamientos de riego y nitrógeno. Los valores obtenidos de tasa de incremento del índice de cosecha son similares a los publicados por Román (2009), no obstante los valores finales de IC difieren. Román (2009) obtuvo para Llareta y Corcolén INIA valores de IC de 0,47 y 0,44 respectivamente, mientras que en el presente estudio el IC fue de 0,34 para ambas variedades. Esta diferencia radica en que en las condiciones del presente estudio hubo una mayor producción de biomasa (Anexo 10.15), particularmente de rastrojos, lo que disminuyó el índice de cosecha.

## 8. Conclusiones

No hay interacción fecha de siembra x variedad en los coeficientes genéticos relativos a crecimiento.

Los coeficientes genéticos relativos a crecimiento: coeficiente de extinción de radiación fotosintéticamente activa ( $k$ ), eficiencia del uso de la radiación IPAR (RUE), área foliar máxima por planta ( $AF_{máx}$ ) y tasa relativa de incremento del índice de cosecha (HIGRR) no cambian con la fecha de siembra.

Los coeficientes genéticos relativos a crecimiento de Llaretá INIA y Corcolén INIA son iguales.

Bajo las condiciones de estudio la hipótesis planteada es aceptada.

## 9. Referencias Bibliográficas

Amir, J. and Sinclair, T.R. 1991. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28:47-58.

Albrizio, R. and Steduto, P. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology* 130:254-268.

Baker, J., Pinter, P., Reginato, R. and Kanemasu E. 1986. Effects of temperature on leaf appearance in spring and winter wheat cultivars. *Agronomy Journal* 78:605-613.

Blum, A., 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulators* 20: 135–148.

Candolle, A. 1855. *Géographie Botanique Raisonnée*, Maisson, Paris.

Calderini, D., Dreccer, M. and Slafer, G. 1997. Consequences of plant breeding on biomass growth, radiation interception and radiation use efficiency in wheat. *Field Crops Research* 52:271-281.

CIREN. 1996. Descripción de suelos materials y símbolos. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N°115.

Cumsille, F. 1995. Métodos estadísticos. Publicaciones Universidad de Chile, facultad de medicina. 37-45p.

Del Pozo, L. 1988. El rol de la temperatura y radiación solar en el crecimiento y la producción del trigo primaveral, con diferentes épocas de siembra. *Agricultura Técnica (Chile)* 48:241-243.

Goudriaan, J. and van Laar, H. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 238 pp

Gregory, P.J., Tennant, D. and 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.

INIA. 1989. Mapa Agroclimatico de Chile. Novoa, R. y Villaseca, S. (Eds). 221p.

Kara, B. and Mujdeci, M. 2010. Influence of late-season nitrogen application on chlorophyll content and leaf area index in wheat. *Scientific Research and Essays* 5: 2299-2303.

Kemanian, A., Stockle, C. and Huggins, D. 2004. Variability of barley radiation-use efficiency. *Crop Science* 44:1662–1672.

Kirby, E. 1985. Significant stages of ear development in winter wheat. In: Day, W., Atkin, R.K. (Eds.), *Wheat Growth and Modelling*. NATO ASO Series. Serie A: Life Sciences, vol. 86, Plenum Press, London.

Koppel, R. & Ingver, A. 2008. Comparison of yield and quality traits of winter and spring wheat. *Latvian Journal of Agronomy* 11:83–89.

Marquardt, D.W. 1963. An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11:431-441.

Monsi, M. and Saeki, T. 1953. U" ber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fu" r die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* 14:22-52.

Moot, D., Jamieson, P., Henderson, A., Ford, M. and Porter, J. 1996. Rate of change in harvest index during grain filling of wheat. *Journal of Agricultural Sciences* 126:387–395.

O'Connel, O., Leary, G., Whitfield, D. and 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.

Porter, J., Jamieson, P. and Wilson, D. 1993. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Research* 33:131–157.

Pourreza, J., Soltani, A., Naderi, A. and Aynehband, A. 2009. Modeling leaf production and Senescence in wheat. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environment Science* 6:498-507.

Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D. and Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 79–98.

Reynolds, M.P., Van Ginkel, M., and Ribaut, J. M. 2000. Avenues for genetic modification of radiation use efficiency in wheat. *Journal of Experimental Botany* 51:459-473.

Román, L. 2009. Determinación de coeficientes genéticos en trigo candeal (*Triticum turgidum* ssp. durum L.) variedades Llaleta y Corcolén INIA en condiciones óptimas. Tesis para optar al grado de Magister en Cs. Agropecuarias. Fac. de Cs. Agronómicas, Universidad de Chile. 62p.

Royo, C., Aparicio, N., Blanco, R. and Villegas, D. 2004. Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 20: 419-430.

Sandrini, L., Hostin, L., Lana, P. y Pellizzari, F. 2007. Un nuevo método de análisis digital para la determinación de los niveles de consumo foliar. *Investigaciones Marinas de Valparaíso* 35:111-116.

Sinclair, T.R. and Muchow, R.C. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65:215-265.

Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1985. Bioestadística: Principios y procedimientos. Mcgraw-Hill. Mexico. 622 p.

Soltani, A., Galeshi, S., Attarbashi, M. and Taheri, A. 2004. Comparison of two methods for estimating parameters of harvest index increase during seed growth. *Field Crops Research* 89:369-378.

Steduto, P. 2003. Biomass water-productivity. Comparing the growth-engines of crop models. In: *FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply*, Rome, February 26-28.

Takahashi, T. and Nakaseko, K. 1990. Seasonal change of photosynthetically active radiation intercepted by a spring wheat canopy and its relation to dry matter production. *Japan Journal of Crop Sciences*. 59:778-784

Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E. 2002. *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola*. Ed. Mundi-Prensa Libros, S.A. España. 125-133p y 147-155p.

Zadoks, J., Chang, T. and Konzak, C. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research* 14:415-421

Watson D. J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and with and between years. *Annals of Botany* 11: 41-76.

## 10. Anexos

### 10.1. Fitosanitarios aplicados al cultivo.

Fecha	Nombre comercial	Ingrediente activo	Dosis	Tipo
Previo siembra	Anagran plus	Mancozeb, Carbendazin	125 g/100 kg semilla <sup>-1</sup>	F
13 julio	Ajax	Metsulfuron metil	10 g/ha	HA
6 sept	Pirimor	Piricarb	250 g/ha	I
30 sept	Pirimor	Piricarb	250 g/ha	I

F: funguicida, I: insecticida, HA: herbicida hoja ancha.

### 10.2. Índice de área foliar medidos para ambas variedades en ambas fechas de siembra

Fecha de siembra 1			
Fecha	Suma térmica	IAF Llaretá	IAF Corcolén
-	°C día	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
10.06.2010	108,75	0,09	0,09
22.06.2010	215,50	0,19	0,18
29.06.2010	265,95	0,26	0,26
12.07.2010	375,30	0,94	0,93
27.07.2010	462,40	1,79	1,68
13.08.2010	587,20	3,58	3,27
24.08.2010	707,75	4,32	4,19
07.09.2010	861,35	5,34	5,95
21.09.2010	1036,75	10,16	8,80
01.10.2010	1150,65	9,02	9,68
09.10.2010	1259,50	11,11	11,19
15.10.2010	1340,10	8,97	10,65
26.10.2010	1516,25	7,33	7,71
29.10.2010	1550,55	5,88	6,96
19.11.2010	1903,25	5,32	4,60

Fecha de siembra 2			
Fecha	Suma térmica	IAF Llaretá	IAF Corcolén
-	°C día	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
24.08.2010	197,55	0,22	0,212
10.09.2010	391,55	1,76	1,82
21.09.2010	526,55	3,00	3,45
09.10.2010	749,3	8,77	8,25
25.10.2010	991,1	10,57	9,03
05.11.2010	1163,45	9,56	7,87
16.11.2010	1344,85	6,93	6,54

### 10.3. Estimación de parámetros de regresión de la relación entre el IAF y suma térmica

#### 10.3.1. F1LL

Función a estimar:  $a * ((1 / (1 + \exp(-b * (ST - c)))) - (1 / (1 + \exp(-d * (ST - e)))))$

Estimaciones iniciales de parámetros:

a = 20,8254

Método de estimación: Marquardt

b = 0,00456

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

c = 835,893                      Número de iteraciones: 16  
d = 0,00263                      Número de llamadas de la función: 112  
e = 1387,12

**Resultados de la Estimación**

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a 95.0%</i>	
			<i>Asintótico Inferior</i>	<i>Superior</i>
a	24.2999	49.401	-85.7727	134.372
b	0.00429962	0.00353715	-0.00358167	0.0121809
c	851.466	215.626	371.019	1331.91
d	0.00264148	0.000581125	0.00134665	0.00393632
e	1319.96	869.084	-616.484	3256.41

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	557.84	5	111.568
Residuo	11.4085	10	1.14085
Total	569.249	15	
Total (Corr.)	201.254	14	

R-Cuadrada = 94.3313 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 92.0638 por ciento  
Error estándar del est. = 1.06811

**10.3.2. F1CC**

Función a estimar:  $a * ((1 / (1 + \text{EXP}(-b * (\text{ST} - c)))) - (1 / (1 + \text{EXP}(-d * (\text{ST} - e)))))$   
Estimaciones iniciales de parámetros:

a = 74,9308                      Método de estimación: Marquardt  
b = 0,00367                      La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.  
c = 1029,18                      Número de iteraciones: 22  
d = 0,00320                      Número de llamadas de la función: 154  
e = 1180,82

**Resultados de la Estimación**

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a 95.0%</i>	
			<i>Asintótico Inferior</i>	<i>Superior</i>
a	81.2634	1206.05	-2606.0	2768.53
b	0.00364722	0.00429935	-0.00593235	0.0132268
c	1034.1	975.882	-1140.3	3208.51
d	0.00322005	0.00246957	-0.0022825	0.00872259
e	1173.68	1274.17	-1665.36	4012.72

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	602.331	5	120.466
Residuo	4.22883	10	0.422883
Total	606.56	15	
Total (Corr.)	220.009	14	

R-Cuadrada = 98.0779 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.309 por ciento  
Error estándar del est. = 0.650294

**10.3.3. F2LL**

Función a estimar:  $a * ((1 / (1 + \text{EXP}(-b * (\text{ST} - c)))) - (1 / (1 + \text{EXP}(-d * (\text{ST} - e)))))$   
Estimaciones iniciales de parámetros:

a = 13,0907                      Método de estimación: Marquardt  
b = 0,00824                      La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.  
c = 647,00                      Número de iteraciones: 1

d = 0,00504                      Número de llamadas de la función: 9  
e = 1371,02

#### Resultados de la Estimación

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a Asintótico	
			Inferior	Superior
a	13.0897	5.10073	-8.85693	35.0364
b	0.00825185	0.00197532	-0.000247265	0.016751
c	646.946	59.5046	390.919	902.974
d	0.00504031	0.00405493	-0.0124067	0.0224873
e	1371.06	137.001	781.592	1960.52

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	339.844	5	67.9689
Residuo	0.355232	2	0.177616
Total	340.2	7	
Total (Corr.)	102.268	6	

R-Cuadrada = 99.6526 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.9579 por ciento  
Error estándar del est. = 0.421445

#### 10.3.4. F2CC

Función a estimar:  $a \cdot \left( \frac{1}{1 + \exp(-b \cdot (ST - c))} \right) - \left( \frac{1}{1 + \exp(-d \cdot (ST - e))} \right)$

Estimaciones iniciales de parámetros:

a = 12,0052                      Método de estimación: Marquardt  
b = 0,00815                      La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.  
c = 593,950                      Número de iteraciones: 1  
d = 0,00330                      Número de llamadas de la función: 9  
e = 1391,29

Número de llamadas de la función: 9

#### Resultados de la Estimación

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a Asintótico	
			Inferior	Superior
a	12.0049	5.77697	-12.8514	36.8612
b	0.00815714	0.00295755	-0.00456817	0.0208825
c	593.903	32.1443	455.597	732.208
d	0.00330471	0.00235141	-0.00681261	0.013422
e	1391.35	281.181	181.527	2601.18

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	269.346	5	53.8692
Residuo	0.253834	2	0.126917
Total	269.6	7	
Total (Corr.)	72.2008	6	

R-Cuadrada = 99.6484 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.9453 por ciento  
Error estándar del est. = 0.356254

#### 10.4. Promedios diarios de la fracción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada para ambas variedades y fechas de siembra

Fecha de siembra 1		
Fecha	Intercepción Llaleta	Intercepción Corcolén
-	-	-

10.06.2010	0,046	0,049
22.06.2010	0,162	0,172
29.06.2010	0,185	0,204
12.07.2010	0,385	0,378
27.07.2010	0,44	0,466
13.08.2010	0,827	0,85
24.08.2010	0,947	0,943
07.09.2010	0,976	0,977
21.09.2010	0,982	0,987
01.10.2010	0,991	0,991
09.10.2001	0,989	0,991
15.10.210	0,986	0,987
26.10.2010	0,984	0,984
29.10.2010	0,987	0,987
19.11.2010	0,98	0,98
25.11.2010	0,987	0,988

Fecha	Fecha de siembra 1	
	Intercepción Llaleta	Intercepción Corcolén
-	-	-
24.08.2010	0,105	0,101
10.09.2010	0,52	0,514
21.09.2010	0,777	0,75
09.10.2010	0,928	0,929
25.10.2010	0,978	0,977
05.11.2010	0,981	0,982
16.11.2010	0,972	0,96
24.11.2010	0,977	0,977
03.12.2010	0,981	0,977

**10.5. Estimación del coeficiente de extinción de PAR a partir de la relación entre la fracción de PAR interceptada y el índice de área foliar**

**10.5.1. FILL**

Función a estimar:  $1 - \exp(-k \cdot IAF)$

Estimaciones iniciales de parámetros:

$k = 0,498848$

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 1

Número de llamadas de la función: 4

**Resultados de la Estimación**

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a 95.0%	
			Asintótico Inferior	Superior
k	0.498596	0.0389547	0.415046	0.582146

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	9.69328	1	9.69328
Residuo	0.0423314	14	0.00302367
Total	9.73561	15	
Total (Corr.)	1.86528	14	

R-Cuadrada = 97.7306 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.7306 por ciento  
Error estándar del est. = 0.0549879

### 10.5.2. F1CC

Función a estimar: 1-EXP(-k\*IAF)

Estimaciones iniciales de parámetros:

k = 0,536702 Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 1

Número de llamadas de la función: 4

#### Resultados de la Estimación

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a 95.0%</i>	
			<i>Asintótico Inferior</i>	<i>Superior</i>
k	0.53649	0.0400255	0.450644	0.622337

#### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	9.78199	1	9.78199
Residuo	0.0363764	14	0.00259831
Total	9.81837	15	
Total (Corr.)	1.82902	14	

R-Cuadrada = 98.0112 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.0112 por ciento  
Error estándar del est. = 0.0509736

### 10.5.3. F2LL

Función a estimar: 1-EXP(-k\*IAF)

Estimaciones iniciales de parámetros:

k = 0,451997 Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a convergencia de los parámetros estimados.

Número de iteraciones: 1

Número de llamadas de la función: 3

#### Resultados de la Estimación

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a 95.0%</i>	
			<i>Asintótico Inferior</i>	<i>Superior</i>
k	0.451997	0.0254697	0.389675	0.514319

#### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	4.60486	1	4.60486
Residuo	0.0054215	6	0.000903583
Total	4.61029	7	
Total (Corr.)	0.655992	6	

R-Cuadrada = 99.1735 por ciento  
R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.1735 por ciento  
Error estándar del est. = 0.0300597

### 10.5.4. F2CC

Función a estimar: 1-EXP(-k\*IAF)

Estimaciones iniciales de parámetros:

k = 0,4085 Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 1

Número de llamadas de la función: 4

### Resultados de la Estimación

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a Asintótico	
			Inferior	Superior
k	0.408545	0.0165885	0.367955	0.449136

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4.53765	1	4.53765
Residuo	0.00314395	6	0.000523992
Total	4.54079	7	
Total (Corr.)	0.65835	6	

R-Cuadrada = 99.5225 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.5225 porciento

Error estándar del est. = 0.0228909

### 10.6. Test de paralelismo para el coeficiente de extinción PAR (k) en cada tratamiento.

		Gl	tc	t <sub>0.975 (n1+n2-4)</sub>	Significancia
F1LL	F1CC	26	0,05315735	2,05553	ns
F1LL	F2LL	18	1,51088868	2,10092	ns
F1LL	F2CC	18	0,90663483	2,10092	ns
F1CC	F2LL	18	1,5950815	2,10092	ns
F1CC	F2CC	18	0,94834452	2,10092	ns
F2LL	F2CC	10	-0,44427016	-2,22814	ns

### 10.7. Promedios de materia seca medida para ambas variedades y fechas de siembra

Fecha	Fecha de siembra 1	
	Materia Seca Llaleta g m <sup>-2</sup>	Materia Seca Corcolén g m <sup>-2</sup>
-		
10.06.2010	3,8	3,28
22.06.2010	8,09	9,01
29.06.2010	14,96	18,68
12.07.2010	29,68	31,28
27.07.2010	70,98	68,93
13.08.2010	151,95	138,56
24.08.2010	297,44	319,63
07.09.2010	475,18	507,35
21.09.2010	753,99	780,81
01.10.2010	955,95	1237,91
09.10.2010	1382,46	1411,93
15.10.2010	1519,86	1666,36
26.10.2010	1686,26	1695,64
29.10.2010	1788,21	1717,76
19.11.2010	2360,65	2394,44
25.11.2010	2605,13	2782,7

Fecha	Fecha de siembra 2	
	Materia Seca Llaleta g m <sup>-2</sup>	Materia Seca Corcolén g m <sup>-2</sup>
-		

24.08.2010	7,36	8,1
10.09.2010	63,19	76,18
21.09.2010	202,84	214,51
09.10.2010	520,65	502,23
25.10.2010	1017,11	952,1
05.11.2010	1308,14	1290,46
16.11.2010	1683,28	1578,56
24.11.2010	2093,8	2122,27
03.12.2010	2401,48	2347,51

**10.8. Promedios de radiación fotosintéticamente activa interceptada estimada para ambas variedades y fechas de siembra**

Fecha	Fecha de siembra 1	
	LLF1 MJ m <sup>-2</sup>	CCF1 MJ m <sup>-2</sup>
-		
10.06.2010	0,005	1,452
22.06.2010	2,246	6,423
29.06.2010	6,115	11,768
12.07.2010	20,709	28,696
27.07.2010	48,603	58,217
13.08.2010	97,385	107,467
24.08.2010	146,916	156,852
07.09.2010	227,478	237,43
21.09.2010	330,058	340,349
01.10.2010	417,862	428,485
09.10.2001	488,51	499,43
15.10.210	528,48	539,604
26.10.2010	640,006	651,972
29.10.2010	667,35	679,597
19.11.2010	886,681	901,536
25.11.2010	950,358	964,936

Fecha	Fecha de siembra 2	
	LLF1 MJ m-2	CCF1 MJ m-2
-		
24.08.2010	6,179	0,707
10.09.2010	34,557	24,809
21.09.2010	88,319	80,02
09.10.2010	234,961	226,05
25.10.2010	375,616	364,27
05.11.2010	491,158	476,964
16.11.2010	612,986	594,35
24.11.2010	702,752	681,245
03.12.2010	791,825	773,454

**10.9. Estimación de la eficiencia de uso de la radiación (RUE) a partir de la relación entre la materia seca producida y la radiación fotosintéticamente activa interceptada**

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,92
Error típico	84,44
Observaciones	16

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	24340659,1	24340659,1	3413,39	3,9815E-18
Residuos	15	106963,8145	7130,920968		
Total	16	24447622,92			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
RUE F1LL	2,66333438	0,04558609	58,42427817	4,121E-19	2,56616993	2,76049883

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,92
Error típico	110,97
Observaciones	16

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	26415251,3	26415251,3	2145,04	1,0126E-16
Residuos	15	184718,3876	12314,55917		
Total	16	26599969,69			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
RUE F1CC	2,72101142	0,058750616	46,31460222	1,3189E-17	2,59578744	2,84623539

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,87
Error típico	93,47
Observaciones	9

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	15976598,67	15976598,67	1828,57451	9,982E-10
Residuos	8	69897,50144	8737,187679		
Total	9	16046496,18			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
RUE F2LL	2,86739576	0,067055022	42,76183473	9,8615E-11	2,71276661	3,02202492

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
-------------------------------------	--

Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
R <sup>2</sup> ajustado	0,86
Error típico	109,83
Observaciones	9

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>G.L.</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regresión	1	15286089,71	15286089,71	1267,14367	3,5846E-09
Residuos	8	96507,38151	12063,42269		
Total	9	15382597,09			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
RUE F2CC	2,88710361	0,081105338	35,59696154	4,2469E-10	2,70007436	3,07413285

#### 10.10. Test de paralelismo para eficiencia de uso de la radiación (RUE) en cada tratamiento

		<i>GI</i>	<i>tc</i>	<i>t</i> <sub>0.975 (n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-4)</sub>	<i>Significancia</i>
F1LL	F1CC	34	-0,60465919	2,03224	ns
F1LL	F2LL	24	-1,69992536	2,0639	ns
F1LL	F2CC	24	-1,71578989	2,0639	ns
F1CC	F2LL	24	-1,01969023	2,0639	ns
F1CC	F2CC	24	-1,08675445	2,0639	ns
F2LL	F2CC	14	-0,10636681	2,14479	ns

#### 10.11. Estimación de parámetros de regresión de la relación entre el área foliar por planta (AFP) y el número de hojas del tallo principal (NHTP)

##### 10.11.1. F1LL

Función a estimar:  $a/(1+b*EXP(-c*NHTP F1LL))$

Estimaciones iniciales de parámetros:

AFmáx = 0,5      Método de estimación: Marquardt

b = 0,1      La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

c = 0,1      Número de iteraciones: 22

Número de llamadas de la función: 105

#### Resultados de la Estimación

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a Asintótico Inferior</i>	<i>95.0% Superior</i>
AFmáx	0.0441133	0.0072627	0.0269397	0.0612869
b	827.251	1552.58	-2844.03	4498.54
c	1.12076	0.366064	0.25515	1.98636

#### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GI</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	0.00397667	3	0.00132556
Residuo	0.0000885864	7	0.0000126552
Total	0.00406526	10	
Total (Corr.)	0.00199145	9	

R-Cuadrada = 95.5517 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.2807 por ciento

Error estándar del est. = 0.00355741

### 10.11.2. F1CC

Función a estimar:  $a/(1+b*EXP(-c*NHTP F1CC))$

Estimaciones iniciales de parámetros:

AFmáx = 0,0511 Método de estimación: Marquardt

b = 105,552 La estimación se detuvo debido a convergencia de los parámetros estimados.

c = 0,717438 Número de iteraciones: 6

Número de llamadas de la función: 25

#### Resultados de la Estimación

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a Asintótico		95.0%
			Inferior	Superior	
AFmáx	0.0439287	0.000969984	0.041635		0.0462223
b	241.767	41.0144	144.783		338.751
c	0.919831	0.0368483	0.832698		1.00696

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0.00394005	3	0.00131335
Residuo	0.00000123744	7	1.76777E-7
Total	0.00394129	10	
Total (Corr.)	0.00189384	9	

R-Cuadrada = 99.9347 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.916 por ciento

Error estándar del est. = 0.000420448

### 10.11.3. F2LL

Función a estimar:  $a/(1+b*EXP(-c*NHTP F2LL))$

Estimaciones iniciales de parámetros:

AFmáx = 0,05 Método de estimación: Marquardt

b = 200,0 La estimación se detuvo debido a convergencia de los parámetros estimados.

c = 0,5 Número de iteraciones: 12

Número de llamadas de la función: 54

#### Resultados de la Estimación

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza a Asintótico		95.0%
			Inferior	Superior	
AFmáx	0.0476302	0.00261743	0.0363683		0.0588921
b	198.889	79.1711	-141.757		539.534
c	0.92802	0.0932942	0.526607		1.32943

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0.00323262	3	0.00107754
Residuo	0.00000194354	2	9.71771E-7
Total	0.00323456	5	
Total (Corr.)	0.00133597	4	

R-Cuadrada = 99.8545 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.709 por ciento

Error estándar del est. = 0.000985785

### 10.11.4. F2CC

Función a estimar:  $a/(1+b*EXP(-c*NHTP F2CC))$

Estimaciones iniciales de parámetros:

AFmáx = 0,05 Método de estimación: Marquardt

b = 200,0 La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

c = 0,5 Número de iteraciones: 17

Número de llamadas de la función: 86

**Resultados de la Estimación**

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar Asintótico</i>	<i>Intervalo Confianza a 95.0%</i>	
			<i>Asintótico Inferior</i>	<i>Superior</i>
AFmáx	0.0403493	0.00127128	0.0348794	0.0458192
b	223.877	80.7862	-123.718	571.472
c	1.01239	0.0849408	0.646921	1.37786

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	0.00285044	3	0.000950148
Residuo	7.78027E-7	2	3.89013E-7
Total	0.00285122	5	
Total (Corr.)	0.00105994	4	

R-Cuadrada = 99.9266 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.8532 por ciento

Error estándar del est. = 0.000623709

**10.12. Índice de cosecha medido para cada variedad y fecha de siembra**

<b>Fecha de siembra 1</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Índice de cosecha Llaretá</b>	<b>Índice de cosecha Corcolén</b>
-	-	-
15.10.2010	0,06	0,06
26.10.2010	0,12	0,13
29.10.2010	0,15	0,16
19.11.2010	0,29	0,27
26.11.2010	0,35	-
30.11.2010	-	0,35

<b>Fecha de siembra 2</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Índice de cosecha Llaretá</b>	<b>Índice de cosecha Corcolén</b>
-	-	-
05.11.2010	0,12	0,11
16.11.2010	0,18	0,20
24.11.2010	0,26	0,25
11.12.2010	0,35	-
15.12.2010	-	0,35

**10.13. Estimación de la Tasa relativa de incremento del índice de cosecha a partir de la relación entre el índice de cosecha y la edad fenológica del cultivo****10.13.1. F1LL**

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99787078
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99574609
R <sup>2</sup> ajustado	0,99432811
Error típico	0,00916198
Observaciones	5

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	0,05894671	0,05894671	702,232872	0,0001179
Residuos	3	0,00025183	8,3942E-05		

Total	4	0,05919854				
	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	-0,48721331	0,02608961	-18,6746118	0,00033516	-0,57024209	-0,40418453
EF Llareta	0,84073511	0,03172624	26,4996768	0,0001179	0,73976805	0,94170216

### 10.13.2. F1CC

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99545459
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99092985
R <sup>2</sup> ajustado	0,98790646
Error típico	0,01277692
Observaciones	5

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	0,05350593	0,05350593	327,7551	0,00036762
Residuos	3	0,00048975	0,00016325		
Total	4	0,05399568			

	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	-0,43454114	0,03518831	-12,3490207	0,00114397	-0,54652605	-0,322556
EF Corcolén	0,78396008	0,04330312	18,104008	0,00036762	0,64615021	0,921769

### 10.13.3. F2LL

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99271043
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,98547399
R <sup>2</sup> ajustado	0,97821099
Error típico	0,0149993
Observaciones	4

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	0,03052605	0,03052605	135,684058	0,00728957
Residuos	2	0,00044996	0,00022498		
Total	3	0,03097601			

	<b>Coeficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	-0,34272648	0,04971287	-6,89412021	0,02039828	-0,55662369	-0,12882928
EF Llareta	0,70156058	0,06022832	11,64835	0,00728957	0,44241903	0,96070214

### 10.13.4. F2CC

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,98854299
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,97721724
R <sup>2</sup> ajustado	0,96582586
Error típico	0,01885807
Observaciones	4

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<b>G.L.</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	1	0,03050768	0,03050768	85,785677	0,01145701
Residuos	2	0,00071125	0,00035563		
Total	3	0,03121893			

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Inferior 95%</b>	<b>Superior 95%</b>
Intercepción	-0,29853408	0,05769542	-5,17431205	0,03538007	-0,54677742	-0,05029075
EF Corcolén	0,66024859	0,07128532	9,26205577	0,01145701	0,35353262	0,96696455

**10.14. Test de paralelismo para tasa de incremento del índice de cosecha para cada tratamiento**

		<b>Gl</b>	<b>tc</b>	<b>t<sub>0,975 (n<sub>1</sub>+n<sub>2</sub>-4)</sub></b>	<b>Significancia</b>
F1LL	F1CC	6	1,05397229	2,44691	ns
F1LL	F2LL	5	2,21552779	2,57058	ns
F1LL	F2CC	5	2,53678879	2,57058	ns
F1CC	F2LL	5	1,14387969	2,57058	ns
F1CC	F2CC	5	1,57223989	2,57058	ns
F2LL	F2CC	4	0,43966661	2,77645	ns

**10.15. Promedios del Rendimiento, biomasa, índice de cosecha y componentes de rendimiento en términos de materia seca.**

	<b>B</b>	<b>Rend</b>	<b>IC</b>	<b>PS 1000</b>	<b>Esp m<sup>-2</sup></b>	<b>Gr m<sup>-2</sup></b>
	<b>Kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>Kg ha<sup>-2</sup></b>	<b>-</b>	<b>g</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>FS</b>						
F1	21260,3	7428,1	0,35	55,46	468	13402
F2	22265,1	7850,6	0,35	54,04	507	14535
†	0,428	0,078	0,801	0,470	0,468	0,004
<b>Var</b>						
LL	21702,4	7648,0	0,35	54,47	488	14066
CC	21823,1	7630,7	0,35	55,02	486	13871
†	0,878	0,966	0,87	0,770	0,923	0,733
<b>FS x Var</b>						
F1LL	20863,9	7347,9	0,35	55,99	464	13104
F1CC	22540,9	7948,0	0,35	52,95	512	15028
F2LL	21656,8	7508,2	0,35	54,92	471	13700
F2CC	21989,4	7753,1	0,35	55,13	502	14042
†	0,406	0,665	0,96	0,405	0,562	0,197