



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**APORTE DE VARIABLES AGRONÓMICAS Y FISIOLÓGICAS AL AUMENTO  
EN RENDIMIENTO DE LAS VARIEDADES DE TRIGO CANDEAL LIBERADAS  
POR EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO CHILENO ANTES Y DESPUÉS DE  
LA REVOLUCIÓN VERDE**

**IGNACIO PARDO ABARCA**

**SANTIAGO-CHILE  
2022**



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**APORTE DE VARIABLES AGRONÓMICAS Y FISIOLÓGICAS AL AUMENTO  
EN RENDIMIENTO DE LAS VARIEDADES DE TRIGO CANDEAL LIBERADAS  
POR EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO CHILENO ANTES Y DESPUÉS DE  
LA REVOLUCIÓN VERDE**

**CONTRIBUTION OF AGRONOMIC AND PHYSIOLOGICAL TRAITS TO  
INCREASED YIELD OF DURUM WHEAT VARIETIES RELEASED BY THE  
CHILEAN BREEDING PROGRAM BEFORE AND AFTER THE GREEN  
REVOLUTION**

**IGNACIO PARDO ABARCA**

**SANTIAGO-CHILE  
2022**



# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

## MEMORIA DE TÍTULO

### APORTE DE VARIABLES AGRONÓMICAS Y FISIOLÓGICAS AL AUMENTO EN RENDIMIENTO DE LAS VARIEDADES DE TRIGO CANDEAL LIBERADAS POR EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO CHILENO ANTES Y DESPUÉS DE LA REVOLUCIÓN VERDE

Memoria para optar al título profesional de:  
Ingeniero Agrónomo.

**IGNACIO PARDO ABARCA**

	Calificaciones
<b>Profesor Guía</b> Sra. Paola Silva C. Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc. Dra.	 7,0
<b>Profesores Evaluadores</b> Sr. Marco Garrido S. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc. Dr.	 6,3
Sra. María Loreto Prat D. Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc. Dra.	 7,0
<b>Colaborador</b> Sra. Marcela Opazo I. Ingeniera Agrónoma, Dra.	

SANTIAGO-CHILE  
2022

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo esta dedicado a mi madre, Ana Abarca, y a mi padre, José Manuel Pardo, quienes siempre me apoyaron en todo ámbito de mi vida y buscaron entregarme lo mejor que estuvo a su alcance. A mi hermano, Nicolás Pardo, quién fue un oído incondicional para poder ordenar mis ideas y sacar adelante esta memoria. A mi pareja, Constanza González, por entregarme su calma y apoyo en los momentos más difíciles.

También esta dedicado a mis abuelas y abuelos, en especial a ellos, David Abarca y Luis Pardo, quienes, desde su experiencia y amor por la agricultura, me entregaron la convicción de que este era el camino a seguir. Gracias por todos sus relatos, son verdaderos tesoros.

Muchas gracias a mi profesora guía, Paola Silva, fue realmente un honor haber tenido la oportunidad de trabajar y sacar adelante esta memoria bajo su alero. Muchas gracias por su guía, apoyo, visión, comprensión, paciencia, disposición y sobre todo por creer en mí en ese momento donde no tenía la claridad de como cerrar esta etapa universitaria. Admiración y respeto por siempre hacia su persona.

Agradecer al Dr. Christian Alfaro, su gestión y conocimientos permitieron formular y llevar a cabo esta memoria, además, mantuvo siempre la mejor disposición de ayudar en lo que fuese necesario. A todo el equipo de INIA Los Tilos, por el manejo del ensayo y proporcionar el material necesario para su realización

A todo el equipo del laboratorio SAP, a la profesora Marcela Opazo, quien, como colaboradora, entregó su apoyo y conocimientos en la formulación y realización de este proyecto. A Marcelo, José, Andrea, Don Pato y todo aquél que me brindó su ayuda en las salidas a terreno e incontables mediciones.

*“La verdadera revolución se encuentra en amar, respetar y cultivar la tierra”*

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
SUMMARY .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS .....	6
Lugar de estudio.....	6
Materiales.....	6
Diseño experimental.....	7
Manejo experimental.....	7
Mediciones .....	8
Variables agronómicas .....	8
Variables fisiológicas.....	8
Análisis estadístico.....	10
RESULTADOS.....	12
Descripción meteorológica.....	12
Análisis de interacción variedad x año.....	12
Progreso genético del rendimiento y de las variables agronómicas.....	14
Progreso genético de las variables fisiológicas.....	19
Variables modelo Monteith.....	21
Aporte de la biomasa y el IC al Rendimiento .....	22
Aporte de la cantidad de <i>PAR</i> <sub>i</sub> y EUR a la biomasa .....	23
DISCUSIÓN .....	24
CONCLUSIONES .....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	28
APÉNDICES.....	32

## RESUMEN

La Revolución Verde provocó un aumento en los rendimientos de cereales a través de la liberación de variedades con genes enanizantes de alto rendimiento potencial. El objetivo de este trabajo fue determinar el aporte de las variables agronómicas y fisiológicas al rendimiento previo y posterior a la Revolución Verde, de genotipos liberados por el programa de mejoramiento chileno.

Se analizaron los datos de las temporadas 2018 y 2019, se midieron rasgos agronómicos y fisiológicos de 18 genotipos de trigo candeal liberados por el programa de mejoramiento chileno. El experimento bajo condiciones potenciales se llevó a cabo en el Centro Experimental Los Tilos de INIA, ubicado en la zona central de Chile. Se determinó el progreso genético de las variables agronómicas y fisiológicas, y a través del método de Stepwise se obtuvo el aporte de las variables al rendimiento considerando el modelo de Monteith.

Previo a la Revolución Verde, no se encontró progreso genético significativo para el rendimiento en grano, sin embargo, si hubo en el caso del índice de cosecha y la altura. Posterior a la Revolución Verde, se obtuvo un progreso genético significativo en el rendimiento en grano de  $43 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Durante este periodo, se calculó el aporte de las variables al rendimiento, la biomasa aportó en un 79%, mientras que el índice de cosecha en un 21%. De acuerdo al modelo de Monteith, el mayor aporte a la producción de biomasa fue la eficiencia en el uso de la radiación, por encima de la cantidad de radiación interceptada por los genotipos.

**Palabras claves:** Trigo candeal, Revolución Verde, Rendimiento potencial, Progreso genético, Stepwise.

## SUMMARY

The Green Revolution produced an increase in cereal yields through the release of varieties with dwarfing genes of high yield potential. The purpose of this work was to determine the contribution of agronomic and physiological variables before and after the Green Revolution to yield of genotypes released by the Chilean breeding program.

Data from two years, 2018 and 2019, were analyzed. Agronomic and physiological traits of 18 candeal wheat genotypes released by the Chilean breeding program were measured. The experiment under potential conditions was carried out in Los Tilos Experimental Center of INIA, located in central area of Chile. The genetic progress of agronomic and physiological variables was determined, and through the Stepwise method, the contribution of the variables to yield was obtained considering the Monteith model.

Before the Green Revolution, no significant genetic progress was found for grain yield; however, there was significant genetic progress for harvest index and height. After the Green Revolution, significant genetic progress was obtained for grain yield, 43 kg·ha<sup>-1</sup> per year. During this period, the contribution of the variables to yield was calculated; biomass contributed 79%, while harvest index contributed 21%. According to the Monteith model, the greatest contribution to biomass production was radiation use efficiency, above the amount of radiation intercepted by the genotypes.

**Key words:** Candeal wheat, Green Revolution, Yield potential, Genetic progress, Stepwise.

## INTRODUCCIÓN

El trigo candeal (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum*) se usa principalmente para la elaboración de pastas, couscous y mote. Cerca de 20 millones de hectáreas son sembradas con trigo a nivel mundial, de las cuales menos del 10% corresponden a trigo candeal y gran parte de este porcentaje se concentra en la zona del Mar Mediterráneo, siendo esta la condición óptima para lograr altos estándares de calidad (Acevedo y Silva, 2007).

En 1960 la Revolución Verde provocó un aumento en la producción de cereales a nivel mundial, como resultado del desarrollo de variedades semienanas de alto rendimiento potencial (Hedden, 2003). El rendimiento potencial se define como el rendimiento que obtiene un genotipo adaptado bajo condiciones de manejo óptimo y en ausencia de estreses bióticos y abióticos (Acevedo y Fereres, 1993; Evans y Fischer, 1999), siendo un concepto muy usado para evaluar el progreso de los programas de mejoramiento a nivel mundial.

En Chile el trabajo de mejoramiento genético en trigo candeal comenzó con el Departamento de genética del Ministerio de Agricultura en 1931, quienes introdujeron la variedad Capelli de origen italiano, la cual fue ampliamente cultivada entre 1944 y 1947 (Hacke, 1986). Desde 1964 el programa de mejoramiento genético de trigo candeal ha sido liderado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la primera variedad con genes enanzantes fue Quilafén liberada en 1970 (Matus, 2007). El programa de mejoramiento de trigo candeal nacional, a lo largo de su historia ha tenido el objetivo de mejorar el rendimiento potencial de sus variedades (INIA, 2015), logrando un aumento de 8.000 a 10.500 kg ha<sup>-1</sup>, aproximadamente entre los trigos liberados post Revolución Verde, entre 1970 y 2010, representado un progreso genético de 63,4 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> (del Pozo *et al.*, 2019), correspondiente a 0,60%.

El progreso genético observado en Chile es más alto que los valores registrados en diferentes países en el mundo, en un periodo similar, luego de la Revolución Verde, Chiari *et al.* (2018) obtuvieron un progreso genético de 24 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> al comparar 20 variedades de trigo candeal de origen español liberadas entre 1980 y 2003. Por otra parte, las variedades de trigo candeal liberadas por CIMMYT entre 1966 y 2003, registraron un progreso genético de 0,49% (Fischer, 2007). Royo *et al.* (2007) compararon variedades liberadas antes y post la Revolución Verde entre los años 1930 y 1995 de trigo candeal de origen español e italiano y encontrando un progreso genético de 0,44% y 0,36%, respectivamente.

Dado el constante incremento de la población mundial, que llegará a 9,3 billones en 2050 y la limitada superficie destinada a la producción de alimentos (Evans, 1998; ONU, 2013), se considera fundamental continuar trabajando en el aumento del rendimiento potencial (Fischer *et al.*, 2014).

El rendimiento potencial según la expresión de Monteith (1977) es muy útil para analizar el comportamiento del rendimiento de un genotipo dado y compararlo con otros genotipos:

$$\text{Rendimiento} = \sum \text{PAR} \cdot f \cdot \text{EUR} \cdot \text{IC}$$

El índice de cosecha (IC) aumentó con la introducción de genes *Rht* llevado a cabo durante la Revolución Verde, es así como previo a esta, existe una correlación positiva entre el IC y el año de liberación y post revolución, no se observan cambios en el IC ni tampoco correlación con el año de liberación (Royo *et al.*, 2007; Del Pozo *et al.*, 2019). La sumatoria ( $\sum$ ) de número de días durante el cual se acumula biomasa, el cual depende de la precocidad del cultivo, es definido como el tiempo a floración y madurez fisiológica (Tardieu, 2013), estos parámetros presentan una correlación positiva con el rendimiento potencial, por lo que genotipos más productivos tendrán un ciclo de desarrollo más largo (Del Pozo *et al.*, 2019). La mayor proporción de luz, en este caso la *PAR* (radiación fotosintéticamente activa), interceptada por el cultivo (*f*) en el caso de trigo se logra temprano en el desarrollo, alrededor de primer nudo, no siendo un factor muy limitante (Tardieu, 2013). La Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) o conversión de radiación interceptada a biomasa es menos variable entre genotipos y está asociada a una mayor fotosíntesis debido a una mayor eficiencia de carboxilación y/o mayor conductancia de CO<sub>2</sub> (Tardieu, 2013), lo cual se ha visto reflejado en estudios que muestran una correlación positiva entre el rendimiento en grano y la  $\Delta^{13}\text{C}$ , lo que indica que genotipos más productivos mantienen una conductancia mayor, sugiriendo que los genotipos liberados post Revolución Verde, al ser más productivos tendrían un EUR mayor (Roche, 2015; Del Pozo *et al.*, 2019). Comprender la magnitud del aporte del IC, la interceptación de la radiación *PAR*, de variables fisiológicas asociadas a EUR y el tiempo de acumulación de biomasa ( $\sum$ ), a lo largo de 100 años de mejoramiento en un programa de gran progreso genético como el de trigo candeal chileno, podrá servir de modelo para especies menos mejoradas.

## **HIPÓTESIS**

Previo a la Revolución Verde el mayor aporte al aumento del rendimiento fue debido al aumento en el IC y posteriormente el mayor aumento del rendimiento se ha debido al mayor EUR.

## **OBJETIVO**

Determinar el aporte de variables agronómicas y fisiológicas al aumento en rendimiento de las variedades de trigo candeal liberadas por el programa de mejoramiento chileno antes y después de la Revolución Verde.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Lugar de estudio

La base de datos que se analizó corresponde a un ensayo que se llevó a cabo los años: 2018 y 2019. El sitio donde se montaron los ensayos fue el Centro Experimental Los Tilos ubicado en el camino Los Tilos 2681 (33°42'34.5"S 70°42'09.9"W), Buin, Provincia del Maipo, Región Metropolitana.

La Región Metropolitana posee un clima mediterráneo caracterizado por tener inviernos fríos y lluviosos junto con veranos secos y cálidos (Santibáñez y Uribe, 1990). Su suelo pertenece a la serie Maipo, de la familia franca fina mixta, de origen aluvial, profundos, planos, sin microrelieves y con un buen drenaje (CIREN, 1996).

### Materiales

El material vegetal fue un grupo de 18 genotipos liberados entre los años 1915-2014 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Año de liberación y origen de los 18 genotipos de trigo candeal en estudio.

<b>Variedad</b>	<b>Año de Liberación</b>	<b>Origen</b>	<b>Variedad</b>	<b>Año de Liberación</b>	<b>Origen</b>
Capelli	1915	Italia	Aromo-INIA	1984	Chile
Capelli Strampelli	1930	Italia	Chagual-INIA	1986	Chile
Capeiti-8	1955	Italia	Chonta-INIA	1990	Chile
Cabildofén	1958	Chile	Licán	1990	Chile
Candealfén 4	1958	Chile	Guayacan INIA	1997	Chile
Candealfén 5	1958	Chile	Llaretta INIA	1997	Chile
Candealfén 6	1958	Chile	Corcolen INIA	2002	Chile
Alifén	1964	Chile	Lleuque	2011	Chile
Quilafén	1970	Chile	Queule	2014	Chile

Fuente: Dr. Christian Alfaro, INIA Rayentué.

## **Diseño experimental**

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizado (DBCA) con cuatro repeticiones y 18 tratamientos, donde el factor de bloqueo fue la pendiente del sector. Cada tratamiento correspondió a una variedad de trigo candeal de distinto año de liberación (1915-2014) indicadas en el Cuadro 1. La unidad experimental fue una parcela de 5 hileras de 2m de largo, separados por 0,2 m cada una.

## **Manejo experimental**

Para el ensayo llevado a cabo en el año 2018 la siembra se realizó el 26 de junio de 2018, mientras que para el ensayo del año 2019 fue realizada el 4 de julio de 2019. En ambos años, las semillas fueron desinfectadas con Anagran Plus 125 g·100 kg<sup>-1</sup> de semillas y se realizó un control pre-emergente de malezas con Bacara, la dosis en 2018 fue de 0,6 L·ha<sup>-1</sup> y para 2019 de 0,8 L·ha<sup>-1</sup>; control post-emergencia con MCPA + AJAX WG, la dosis en 2018 fue de 0,5 L/ha + 6 g·ha<sup>-1</sup> y para 2019 de 1 L·ha<sup>-1</sup> + 10 g·ha<sup>-1</sup>.

De acuerdo con la fertilización, pese a que se realizó un estudio de suelos completo en el lugar, se utilizó una fertilización estándar con el fin de alcanzar el rendimiento potencial del cultivo en ambas temporadas. Se aplicó 200 kg N ha<sup>-1</sup>, parcializado en 20 unidades a siembra, 90 al inicio de macolla y 90 a fines de macolla; y 98 kg K ha<sup>-1</sup>; 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>; 44 kg S ha<sup>-1</sup>; 1 kg B ha<sup>-1</sup>; 1 kg Zn ha<sup>-1</sup>; 36 kg Mg ha<sup>-1</sup> en siembra (Apéndice I).

El riego se efectuó por goteo en el primer año, se consideró un umbral de riego de 50% y un Kc máximo de 1,15 (Allen, 2006) y el ETo se obtuvo de la estación meteorológica Los Tilos. En cuanto al segundo año, el ensayo se regó por tendido con aproximadamente 30 a 35 mm cada riego.

Dado que el ensayo incluyó variedades antiguas con alturas superiores a los 120 cm, se usó una estructura alrededor de cada una de las parcelas de esas variedades para evitar la tendadura de las plantas.

## Mediciones

### Variables agronómicas

**Fenología.** Cada 15 días previo a primer nudo y luego una vez por semana, se registraron los estados de desarrollo de acuerdo con la escala de Zadoks *et al.* (1974). Se consideró que el cultivo alcanzó un estado fenológico cuando el 50% de las plantas de la unidad experimental presentaban dicho estado. El estado de espigadura y madurez fisiológica se registró en días desde la siembra.

**Cobertura.** Una vez cada dos semanas se midieron valores de cobertura, hasta que se observó la cobertura máxima, con la aplicación Canopeo, esta aplicación permite cuantificar un porcentaje de cobertura. La fotografía se tomó de manera paralela al suelo y contempló 3 hileras de cada unidad experimental.

**Biomasa, rendimiento e índice de cosecha.** En cada unidad experimental, una vez determinada la madurez fisiológica, se cosechó 1 m<sup>2</sup> a ras de suelo, sin incluir los bordes de la parcela. De lo cosechado en cada parcela, se separaron 50 tallos con espiga, se obtuvo su peso húmedo para luego ser colocados en una estufa a 70°C durante 48 horas, obteniendo así su peso seco. El resto fue pesado y trillado, en el ensayo del año 2018 el trillado se realizó a mano y en el ensayo del año 2019 se realizó con una máquina trilladora estacionaria Vogel Nursery Thresher (Bill's Welding, Pullman, WA, USA). Posteriormente, se separaron 250 granos de cada unidad experimental, se obtuvo su peso húmedo y se colocaron las muestras a la estufa (70°C por 48 h) para obtener su peso seco. Con estos datos se calculó la biomasa, el rendimiento y los componentes de rendimiento: granos m<sup>-2</sup>, peso de 1000 granos. También se calculó el índice de cosecha con la siguiente formula:

IC = Rendimiento/Biomasa aérea a la cosecha

### Variables fisiológicas

**Intercambio gaseoso a nivel de hoja.** Se midieron 5 hojas banderas, sin agua libre y expuestas a la luz, sanas y representativas de la unidad experimental. Las mediciones se realizaron en días soleados entre las 10:00 y las 16:00, desde floración hasta inicio llenado de grano. La asimilación neta de CO<sub>2</sub> la primera temporada se realizó por medio de un analizador de gases infrarrojo CIRAS-2, (PPSystem, Amesbury, MA, USA) y en la segunda temporada se usó un TARGAS-1, (PPSystem, Amesbury, MA, USA). La conductancia estomática y la transpiración en ambas temporadas se midieron con un porómetro (SC-1 Leaf Porometer).

**Discriminación  $^{13}\text{C}$  ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) y enriquecimiento  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ).** Se midió a partir de una submuestra de 200 granos tomados al azar de la cosecha de cada unidad experimental. Los granos se llevaron a estufa ( $70^\circ\text{C}$  durante 48 h) y posteriormente se molieron hasta obtener un polvo fino del cual se extrajo 1,0 mg, luego se usó un analizador elemental acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas modelo Integra-2 (Sercon Limited, Crewe, UK) ubicado en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Facultad de Ciencias Agronómicas.

El espectrómetro de masa de relación isotópica mide la abundancia relativa (R) de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  y  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , las concentraciones relativas se expresan con relación a un estándar internacional primario, que para  $^{13}\text{C}$  es Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB), y para  $^{18}\text{O}$  es Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). A continuación, se muestra el método de cálculo de la composición isotópica (O'leary, 1981):

$$\delta X(\text{‰}) = \left[ \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right] \times 1000$$

Donde,  $\delta$  es la composición isotópica, X es el isótopo en estudio ( $^{13}\text{C}$  y  $^{18}\text{O}$ ) y R corresponde a la relación de abundancia molar  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  y  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  obtenida de las muestras. La  $\Delta^{13}\text{C}$ , se expresó como una diferencia entre el valor de composición ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de la fuente y del producto (Farquhar *et al.*, 1982):

$$\Delta^{13}\text{C} = \frac{\delta^{13}\text{C}(\text{fuente}) - \delta^{13}\text{C}(\text{producto})}{1 + \delta^{13}\text{C}(\text{fuente}) \div 1000}$$

Siendo la composición isotópica de la atmósfera  $\delta^{13}\text{C}$  (fuente) de  $-8,0 \text{‰}$  (Shoemaker *et al.*, 2010). Se identificará la discriminación de  $^{13}\text{C}$  como  $\Delta^{13}\text{C}$  y el enriquecimiento de  $^{18}\text{O}$  como  $\delta^{18}\text{O}$ .

**Sumatoria de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada ( $\Sigma\text{PARI}$ ).** Se obtuvieron los datos de radiación solar desde la Red Agrometeorológica del INIA. Se consideró como *PAR* la mitad de la radiación solar incidente. Para lograr un valor de interceptación diaria se realizó una parametrización de una función sigmoide que se presenta a continuación:

$$Y = a / (1 + b * e^{-c*X})$$

Donde “Y” fue la fracción de interceptación, “a” el valor máximo de la curva sigmoide, “b” la concavidad de la curva, “c” la pendiente de la curva y “X” los días desde emergencia (10 días luego de la siembra). Los valores ingresados fueron los de cobertura de cada repetición para cada genotipo. Posteriormente se multiplicó para cada día la *PAR* y la fracción de interceptación estimada, obteniendo un valor diario de radiación *PAR* interceptada para cada unidad experimental. Finalmente, para su acumulación se sumaron los datos desde emergencia hasta madurez fisiológica.

**Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR).** Dado que EUR se define como materia seca acumulada por unidad de radiación interceptada por el cultivo en un intervalo de tiempo determinado, se obtuvo un valor de EUR como el cociente de la biomasa a madurez fisiológica y la sumatoria de radiación *PAR* interceptada por el cultivo desde emergencia a madurez fisiológica en cada unidad experimental.

### Análisis estadístico

Para determinar si existe o no interacción entre el año del ensayo y las variedades, se realizó un análisis de la varianza combinado, en donde las repeticiones están anidadas en cada año. Cuando la interacción año x variedad no fue significativa, los datos anuales se promediaron obteniendo un único valor para cada genotipo para ambos años, mientras que, cuando la interacción fue significativa, es decir el año del ensayo tiene efecto sobre la variedad, los datos se analizaron por separado.

Los resultados se dividieron en los siguientes dos periodos:

- Previo Revolución Verde, correspondiente a los genotipos liberados entre 1915 y 1964
- Post Revolución Verde correspondiente a los genotipos liberados entre 1970 y 2014.

Se calculó el progreso genético en rendimiento para ambos periodos. Para ello se realizó una regresión lineal del rendimiento de cada genotipo sobre el año de liberación. La pendiente de esta regresión correspondió al progreso genético del periodo (del Pozo *et al.*, 2019; Royo *et al.*, 2007; Zhou *et al.* 2007).

Posteriormente para identificar el aporte de los diferentes rasgos agronómicos y fisiológicos al aumento del rendimiento potencial hecho por el programa nacional de mejoramiento de trigo candeal previo y post Revolución Verde, se realizaron regresiones múltiples. Dada la cantidad de datos y la necesidad de seleccionar e incluir variables dentro del modelo que sean significativas se usó la Regresión StepWise, este método de selección se caracteriza porque además de ingresar variables significativas al modelo, también elimina aquellas variables que pueden dejar de ser significativas al momento de ingresar nuevas variables. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ), es un indicador de la proporción de la variación total de una variable dependiente respecto a su media, explicada por el modelo. De esta forma este coeficiente nos permitió cuantificar de manera sencilla cuanto de la variación observada es explicada por las variables independientes.

El criterio que se utilizó para seleccionar las variables que entraron a la regresión múltiple son los siguientes:

1. El análisis comenzó considerando que el rendimiento es el resultado de la biomasa acumulada a madurez fisiológica y el índice de cosecha, de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento} = \text{Biomasa} * \text{IC}$$

2. Posteriormente se consideraron las variables asociadas a la función del modelo general de crecimiento propuesto por Monteith (1977):

$$\text{Biomasa} = \Sigma PAR * f * EUR$$

Donde la biomasa es el resultado de:  $\Sigma PAR$  que corresponde a la sumatoria de la radiación fotosintéticamente activa del periodo de crecimiento del cultivo,  $f$  que corresponde a la fracción interceptada por el cultivo y  $EUR$  que corresponde a la eficiencia de transformación de la radiación en gramos de materia seca.

Con el fin de conocer el aporte de las variables usadas en cada StepWise, considerando la media entre ambas temporadas, se realizó un análisis de la varianza del modelo obtenido, en donde se calculó el porcentaje de la suma de cuadrados de cada variable en los periodos previo y posterior a la Revolución Verde y el periodo continuo.

Además, se realizó un análisis de correlación entre todas las variables, para esto se usó el promedio de ambas temporadas de cada genotipo, obteniendo un valor de correlación de Pearson y su p-valor respectivo.

El análisis estadístico se realizó con el software estadístico InfoStat, desarrollado por el grupo InfoStat de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (Di Rienzo, *et al.* 2018). Además, se utilizó el software R Studio, desarrollado por R Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria.

## RESULTADOS

### Descripción meteorológica

Los datos obtenidos de precipitación acumulada, temperaturas mínimas y máximas, evapotranspiración de referencia y radiación global de los dos años de estudio se presentan en el Cuadro 2. Aunque las condiciones ambientales fueron bastante similares entre ambas temporadas, los meses de noviembre y diciembre del año 2019 tuvieron una temperatura media mayor que la del año 2018. Cabe destacar la escasa precipitación caída en ambos años, que fue muy por debajo del promedio esperado para la Región Metropolitana, sin embargo, esto no afectó al desarrollo del ensayo debido a que fue un ensayo regado.

Cuadro 2. Datos agroclimáticos del periodo que se desarrolló las variedades de trigo candeal en los años 2018 y 2019.

Meses	2018					2019				
	Pp	T° máx.	T° min.	ETo	Rad	Pp	T° máx.	T° min.	ETo	Rad
	mm	°C		mm	MJ/m <sup>2</sup>	mm	°C		mm	MJ/m <sup>2</sup>
Junio	47,4	16,0	1,6	28,7	8,4	31	15,5	2,0	26,0	6,5
Julio	58,9	15,4	2,4	31,6	9,0	9,9	16,3	1,5	32,1	8,2
Agosto	7,5	18,1	3,0	52,2	11,6	0,0	19,6	3,5	58,1	10,9
Septiembre	19,2	19,7	6,1	67,1	12,9	3,9	20,4	4,3	79,4	15,6
Octubre	1,5	22,0	6,6	93,8	18,6	1,6	23,6	5,9	101,0	19,7
Noviembre	1,0	27,8	8,7	129,8	25,0	0,0	29,7	8,7	140,0	25,7
Diciembre	0,4	28,9	9,8	142,5	27,3	0,0	31,6	10,4	157,0	27,8
Total/media	135,9	21,1	5,5	545,7	112,8	46,0	22,4	5,2	593,9	114,4

### Análisis de interacción variedad x año

Se pudo determinar la existencia de interacción variedad x año estadísticamente significativa en rendimiento, índice de cosecha, PS1000, granos·m<sup>-2</sup>, granos·espiga<sup>-1</sup>, días a antesis y días de llenado de grano. Sin embargo, el porcentaje de contribución de la variedad a la variación total tuvo un efecto de 4 a 7 veces mayor que la contribución de la interacción VxA en la mayoría de las variables evaluadas (Cuadro 3), quedando en evidencia el escaso efecto de esta interacción, por lo que la información se analizó con los datos promediados por año.

Cuadro 3. Porcentaje de la suma de cuadrados del análisis de la varianza combinado para las variables rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), biomasa ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), índice de cosecha, altura,  $\text{granos}\cdot\text{m}^{-2}$ , peso seco 1000 granos, espigas $\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $\text{granos}\cdot\text{espiga}^{-1}$ , días a antesis, días a madurez fisiológica y días de llenado de grano en ambas temporadas.

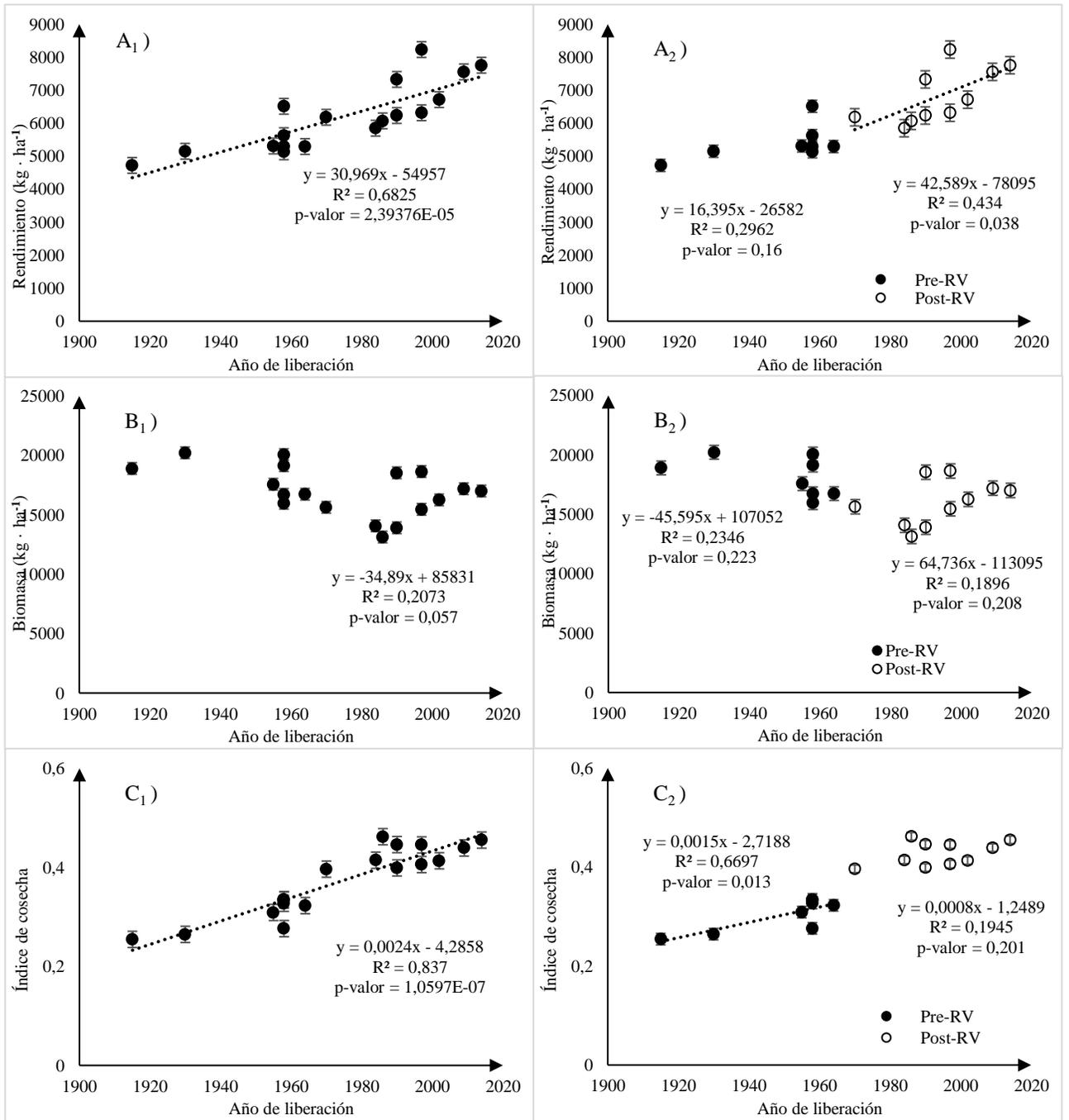
%SC											
Fuentes de variación	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	$\text{G}\cdot\text{m}^{-2}$	PS1000	$\text{E}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{G}\cdot\text{E}^{-1}$	DA	DMF	DLLG
Año	9,74	22,37	0,02	1,19	1,00	11,81	27,66	17,95	79,22	15,35	61,79
Variedad	70,51	58,64	87,98	93,83	80,78	71,92	65,61	38,82	16,91	67,44	20,20
Variedad*Año	19,75	19,00	12,00	4,98	18,21	16,27	6,73	43,23	3,87	17,20	18,01
P-valor											
Año	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	0,835	$\leq 0,01$	0,333	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	0,150	$\leq 0,001$	$\leq 0,05$	$\leq 0,001$
Variedad	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,05$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$				
Variedad*Año	$\leq 0,05$	0,163	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	0,813	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	0,242	$\leq 0,001$

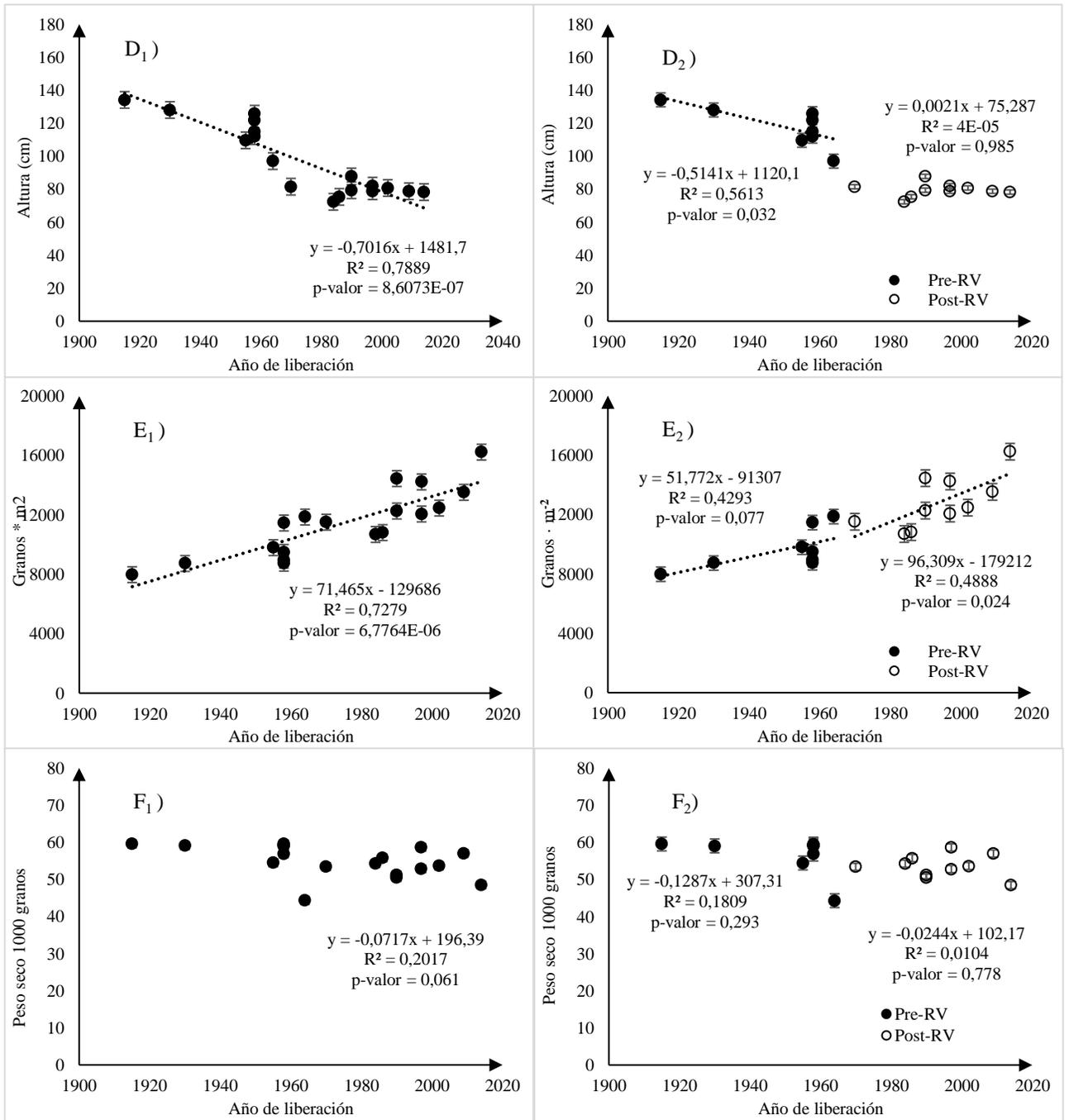
### Progreso genético del rendimiento y de las variables agronómicas

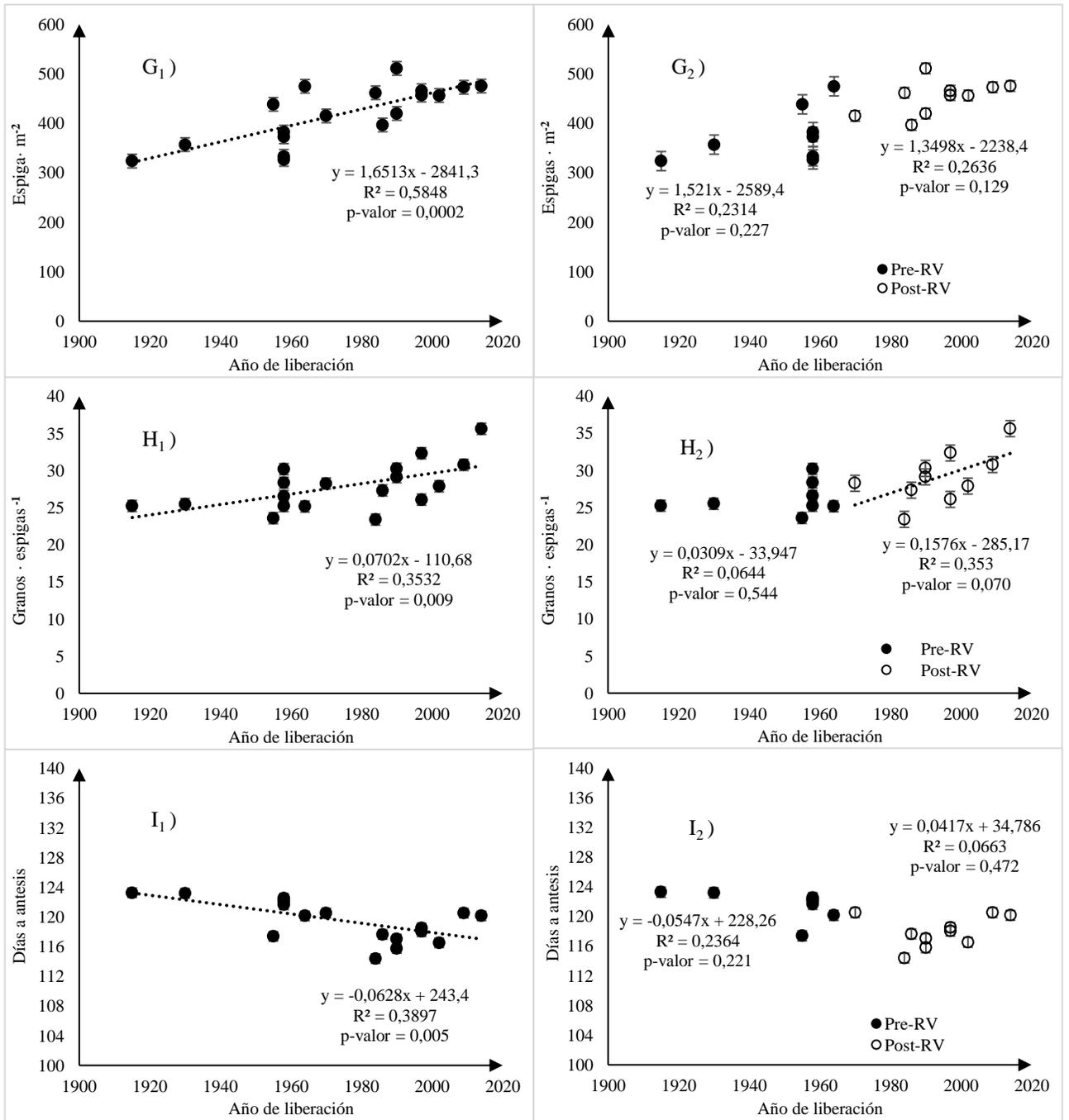
Tomando en cuenta un continuo entre los años 1915 a 2014 (Figura 1, A<sub>1</sub> a K<sub>1</sub>), las variables que mostraron una relación estadísticamente significativa con respecto al año de liberación fueron: rendimiento ( $R^2=0,68$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ), índice de cosecha ( $R^2=0,82$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ), granos por metro cuadrado ( $R^2=0,72$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ), altura ( $R^2=0,79$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ), espigas por metro cuadrado ( $R^2=0,57$ ;  $p\text{-value} \leq 0,01$ ), granos por espiga ( $R^2=0,34$ ;  $p\text{-value} \leq 0,01$ ) y días a antesis ( $R^2=0,38$ ;  $p\text{-value} \leq 0,01$ ) y madurez fisiológica ( $R^2=0,39$ ;  $p\text{-value} \leq 0,01$ ). En su mayoría las variables mostraron una pendiente positiva con respecto al año de liberación de la variedad, salvo la altura y los días a antesis y a madurez fisiológica que mostraron una pendiente negativa (Figura 1, D<sub>1</sub>, I<sub>1</sub> y J<sub>1</sub>).

Previo a la Revolución Verde, en las variedades liberadas entre los años 1915 y 1964, no se observó una relación significativa entre el rendimiento y el año de liberación de las variedades de trigo candeal. Por su parte, el índice de cosecha ( $R^2 = 0,67$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ) si mostró una relación estadísticamente significativa con respecto al año de liberación, aumentando de un 0,25 a 0,32 (Figura 1, C<sub>2</sub>). Además, los granos por metro cuadrado ( $R^2 = 0,43$ ;  $p\text{-value} \leq 0,1$ ) también mostraron una relación significativa con el año de liberación en este periodo, observándose un progreso genético de  $51,8 \text{ granos} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  (Figura 1, E<sub>2</sub>). La altura mostró una relación significativa ( $R^2 = 0,56$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ) con el año de liberación de las variedades previo a la Revolución Verde disminuyendo  $0,51 \text{ cm}$  por cada año (Figura 1, D<sub>2</sub>).

Posterior a la Revolución Verde, en las variedades liberadas entre los años 1970 y 2014, las variables rendimiento ( $R^2 = 0,43$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ), granos por metro cuadrado ( $R^2 = 0,49$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ) y granos por espiga ( $R^2 = 0,35$ ;  $p\text{-value} \leq 0,1$ ) mostraron una relación estadísticamente significativa con respecto al año de liberación de las variedades (Figura 1, A<sub>2</sub>, E<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>). En el caso del rendimiento, luego de la liberación de la variedad Quilafén en el año 1970, se observó un constante aumento, observando un progreso genético de  $42,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  por cada año (Figura 1, A<sub>2</sub>). El índice de cosecha y la altura durante este periodo no mostraron cambios significativos con respecto al año de liberación de los genotipos. De acuerdo con los granos por metro cuadrado, se pudo observar un cambio en la pendiente que comienza en los años 70's, alcanzando un máximo de  $16,230 \text{ granos} \cdot \text{m}^{-2}$  con un progreso genético de  $96,3 \text{ granos} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ , entre los años 1970 y 2014. Finalmente, los granos por espiga mostraron un progreso genético de  $0,1576 \text{ granos} \cdot \text{espiga}^{-1}$  por cada año de liberación, llegando a  $36 \text{ granos por espiga}$ , muy por encima de los  $28 \text{ granos por espiga}$  obtenidos al inicio de este periodo.







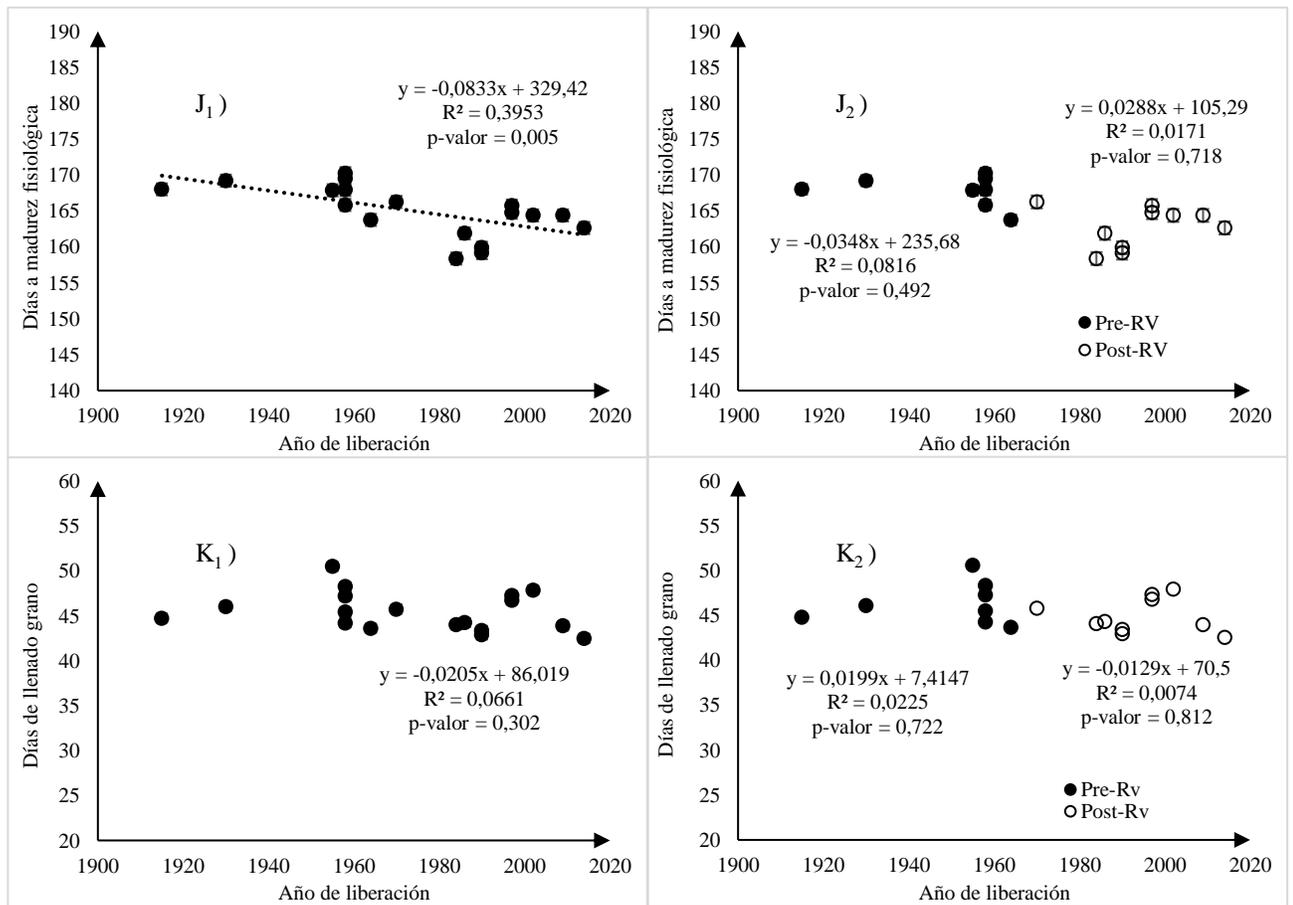


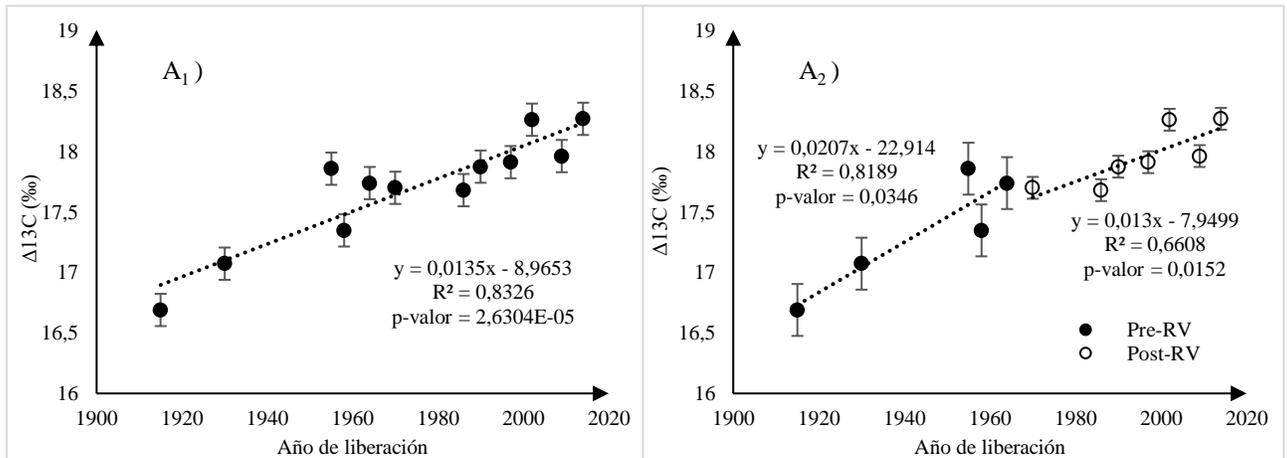
Figura 1. Relación entre el año de liberación de las variedades de trigo candeal con el rendimiento, biomasa, índice de cosecha, altura, granos·m<sup>-2</sup>, peso seco 1000 granos, espigas·m<sup>-2</sup>, granos·espiga<sup>-1</sup>, días a antesis, días a madurez fisiológica y días de llenado de grano. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas (± error estándar) en el continuo de 100 años (n= 18, lado izquierdo, subíndice “1”), pre y post Revolución Verde (n=8 y n=10 respectivamente, lado derecho, subíndice “2”).

### Progreso genético de las variables fisiológicas

En el caso del progreso genético de las variables fisiológicas, considerando el continuo entre los años 1915 y 2014, las variables que presentaron una relación estadísticamente significativa con el año de liberación de las variedades de trigo candeal fueron la discriminación de  $^{13}\text{C}$  ( $R^2=0,84$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ) y el enriquecimiento de  $^{18}\text{O}$  ( $R^2=0,72$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ). La discriminación de  $^{13}\text{C}$  mostró un progreso genético de  $0,013 \text{ ‰ año}^{-1}$ , mientras que el enriquecimiento de  $^{18}\text{O}$  tuvo un progreso genético de  $-0,03 \text{ ‰ año}^{-1}$  (Figura 2, A<sub>1</sub> y B<sub>1</sub>).

Previo a la Revolución Verde, entre los años 1915 y 1964, la discriminación de  $^{13}\text{C}$  fue la única variable que mostró una relación significativa ( $R^2=0,81$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ) con el año de liberación de las variedades de trigo candeal, esta variable presentó un progreso genético de  $0,02 \text{ ‰ año}^{-1}$ , mayor en un 35% al observado en el periodo de 100 años (Figura 2, A<sub>2</sub>).

Entre los años 1970 y 2014, posterior a la Revolución Verde, nuevamente, la única variable que mostró una relación significativa con el año de liberación fue la discriminación de  $^{13}\text{C}$  ( $R^2=0,72$ ;  $p\text{-value} \leq 0,05$ ). Durante estos años, la discriminación de  $^{13}\text{C}$  aumento en una tasa de  $0,013 \text{ ‰}$  por cada año, similar al observado en los 100 años (Figura 2, A<sub>2</sub>).



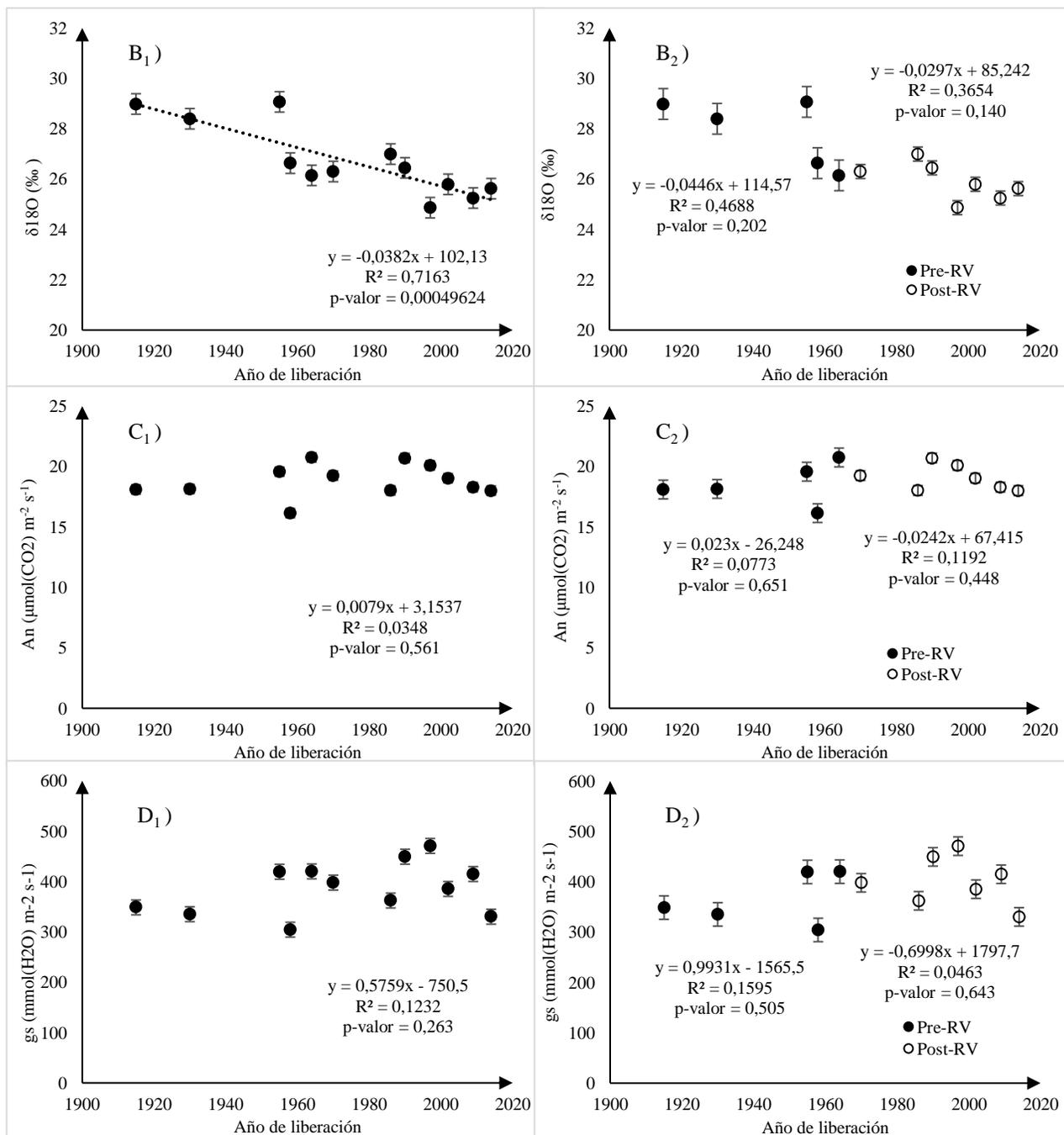


Figura 2. Relación entre el año de liberación de las variedades de trigo candeal y la composición isotópica, enriquecimiento <sup>18</sup>O y discriminación de <sup>13</sup>C, la asimilación neta y la conductancia estomática. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas (± error estándar) de 12 variedades seleccionadas para las variables fisiológicas en el continuo de 100 años (n= 12, lado izquierdo, subíndice “1”), pre y post Revolución Verde (n= 5 y n= 7 respectivamente, lado derecho, subíndice “2”).

### Variables modelo Monteith

Se observó el comportamiento de las variables involucradas en el modelo de Monteith y su relación con el año de liberación de las variedades de trigo candeal. Sólo la sumatoria de radiación *PAR* interceptada mostró una relación estadísticamente significativa con el año de liberación ( $R^2=0,53$ ;  $p\text{-value} \leq 0,001$ ), entre los años 1915 a 2014 (Figura 3,  $A_1$ ). Para este periodo, se calculó un progreso genético negativo, disminuyendo por cada año 2,3  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  de radiación interceptada.

En el caso de los periodos previo y posterior a la Revolución Verde, ninguna de las variables tuvo una relación significativa con el año de liberación.

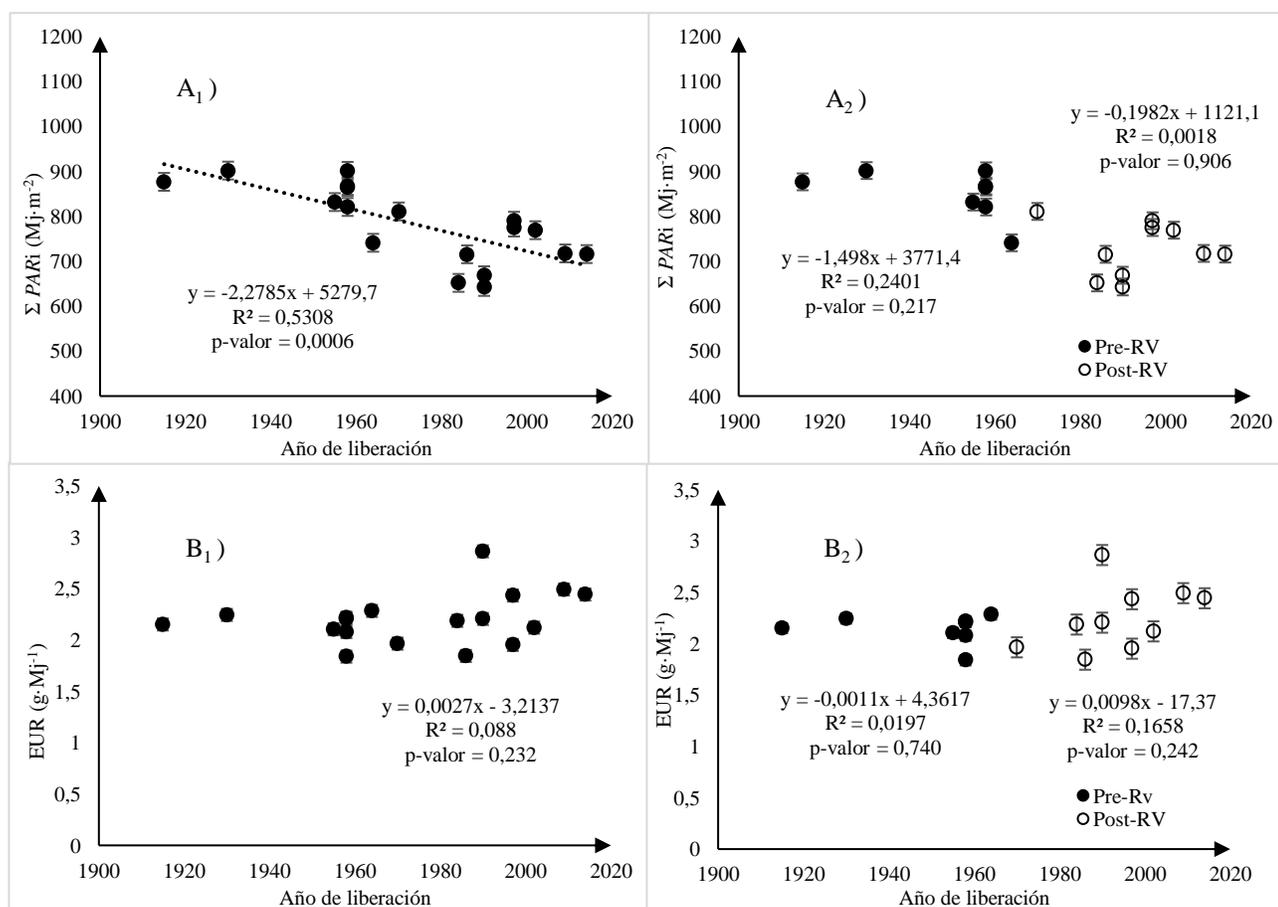


Figura 3. Relación entre el año de liberación de las variedades de trigo candeal, la sumatoria de radiación *PAR* interceptada y la eficiencia del uso de la radiación. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas ( $\pm$  error estándar) en el continuo de 100 años ( $n= 18$ , lado izquierdo, subíndice “1”), pre y post Revolución Verde ( $n=8$  y  $n=10$ , respectivamente, lado derecho, subíndice “2”).

### Aporte de la biomasa y el IC al Rendimiento

En el cuadro 4, se muestran los porcentajes de la suma de cuadrados y el p-valor del análisis de regresión lineal del modelo que considera el rendimiento como producto de la biomasa acumulada a madurez fisiológica y el índice de cosecha obtenido de cada variedad de trigo. Se pudo observar que, luego de utilizar el método de selección StepWise, las variables regresoras del modelo, biomasa e índice de cosecha, tienen una alta importancia predictiva estadísticamente significativa (*p-value*:  $\leq 0,0001$ ) para la variable rendimiento tanto para las variedades liberadas previo y posterior a la Revolución Verde.

Entre los años 1915 y 2014, el índice de cosecha con un 60,98 % de la variación del rendimiento, explicó cerca del doble de lo explicado por la biomasa con un 37,07%. Previo a la Revolución Verde, la biomasa explicó la mayoría de la variación del rendimiento con un 56,3%, mientras que el índice de cosecha un 42,5%. Para el periodo posterior a la Revolución Verde, la biomasa explicó un 78,1%, muy por encima de lo explicado por el índice de cosecha que fue sólo un 21,3% de la variabilidad del rendimiento en grano.

Cuadro 4. Método de selección StepWise (Apéndice VII, VI y VII) para el modelo que contempla al rendimiento como el producto entre la biomasa y el índice de cosecha de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas pre y post Revolución Verde y continuo 100 años. Porcentajes corresponden a la proporción de cada variable en la suma de cuadrados del ANDEVA del modelo. P-valores  $> 0,1$  no son significativos,  $\leq 0,1$  son significativo (+),  $\leq 0,01$  muy significativos (\*\*) y  $\leq 0,001$  altamente significativos (\*\*\*).

Coeficiente. regresión	100 años		Pre-RV		Post-RV	
	%	p-value	%	p-value	%	p-value
Índice cosecha	60,98	$\leq 0,001$ ***	42,45	$\leq 0,05$ *	21,33	$\leq 0,001$ ***
Biomasa	37,07	$\leq 0,001$ ***	56,28	$\leq 0,05$ *	78,11	$\leq 0,001$ ***
Total	98,05	-	98,73	-	99,45	-

### Aporte de la cantidad de *PAR*i y EUR a la biomasa

En el cuadro 5, se muestran los porcentajes de suma de cuadrados y el p-valor del análisis de regresión lineal del modelo de Monteith, el cual considera la biomasa total como la sumatoria del producto de la radiación *PAR* interceptada y la eficiencia del uso de la radiación. Luego del análisis StepWise, para los tres periodos estudiados, la eficiencia del uso de la radiación fue la variable que más porcentaje explicó de la variación en la biomasa de los genotipos. Entre 1915 y 2014 un 58% fue explicado por la EUR y un 41% para la  $\Sigma$  *PAR*i.

Considerando sólo los genotipos liberados previo a la Revolución Verde, la EUR bajo a un 52% y la sumatoria de *PAR* interceptado aumento a un 47%. Posterior a la Revolución Verde, entre los años 1970 y 2014, la EUR nuevamente explicó la mayor parte del cambio con el 60% de la variación, quedándose con el 38% la acumulación de radiación *PAR* interceptada (Cuadro 9).

Cuadro 5. Método de selección StepWise (Apéndice X, XI y XII) del modelo que contempla a la biomasa como el producto entre la sumatoria de *PAR* interceptado y el EUR de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas pre y post Revolución Verde y continuo 100 años. Porcentajes corresponden a la proporción de cada variable en la suma de cuadrados del ANDEVA del modelo. P-valores  $> 0,1$  no son significativos,  $\leq 0,1$  son significativo (+),  $\leq 0,01$  muy significativos (\*\*) y  $\leq 0,001$  altamente significativos (\*\*\*).

Coeficiente. regresión	100 años		Pre-RV		Post-RV	
	%	p-value	%	p-value	%	p-value
EUR	58,04	<0,001***	52,24	<0,01**	60,64	<0,001***
$\Sigma$ <i>PAR</i> i	40,66	<0,001***	47,40	<0,01**	38,16	<0,01**
Total	98,70	-	99,64	-	98,80	-

## DISCUSIÓN

En 100 años de mejoramiento genético, del programa nacional de trigo candeal, se observan progresos en gran parte de las variables estudiadas, excepto en las variables agronómicas: biomasa, PS1000 y días de llenado de grano, y en las variables fisiológicas: An y gs. La naturaleza de evaluación instantánea de An y gs provoca una alta variabilidad en las mediciones pudiendo ser el motivo por el cual no se aprecia progreso genético en estas variables. Por otra parte, la biomasa es una variable que prácticamente no ha sido modificada por el mejoramiento genético, no siendo significativa su relación con el año de liberación en ninguno de los 3 periodos estudiados. Las variedades chilenas se caracterizan por tener un alto valor de PS1000, debido a que el origen de las variedades modernas chilenas proviene de las variedades italianas que se introdujeron al país a principios del siglo XX (Royo *et al.*, 2007). Llama la atención que DLLG no haya cambiado pese a que los días a antesis y madurez fisiológica se redujeron.

El progreso genético del rendimiento en 100 años de mejoramiento del programa nacional de trigo candeal fue de prácticamente  $31 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Previo a la RV, aunque se observa una tendencia al aumento del rendimiento, no se encontró progreso genético significativo. En cambio, post RV el progreso genético fue de  $42,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , sin embargo, bastante menor que los  $63,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  informados por del Pozo *et al.* (2019), estimado con prácticamente las mismas variedades de este estudio, pero evaluadas en Chillán, Región de Ñuble. Y mucho mayor que los  $24 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de genotipos españoles que tenían genes enanizantes liberados desde 1980 al 2003 (Chiari *et al.*, 2018).

La evolución de las variables agronómicas y fisiológicas a lo largo de los 100 años de estudio cambia de manera específica con la variable, de esta manera se observa que: tanto la altura como el IC tuvieron importantes cambios previo RV, la introducción de genes *Rht* provocó un cambio sustancial, sin embargo, una vez introducidos no se observaron más cambios en estas variables. Esto demuestra que previo a la RV, los mejoradores trabajaron constantemente en disminuir la altura de los trigos, De Vita *et al.* (2007) compararon variedades liberadas en Italia durante el siglo 20, encontrando también una importante disminución en la altura previa a la introducción de los genes *Rht*. Por otra parte, en el caso de las  $\text{E} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\Delta^{13}\text{C}$  y  $^{18}\text{O}$  se observan cambios a una misma tasa a lo largo de estos 100 años. Los  $\text{G} \cdot \text{E}^{-1}$  tuvieron cambios solo después de la RV, esto unido al constante incremento de las  $\text{E} \cdot \text{m}^{-2}$  probablemente expliquen el persistente incremento de  $\text{G} \cdot \text{m}^{-2}$  cuya tasa se duplicó post RV. Finalmente, la ausencia o presencia de genes *Rht* provocan un notorio cambio en los días a antesis y a madurez fisiológica, esto último explicado posiblemente por los efectos pleiotrópicos de estos genes *Rht-B1*, derivado de Norin10 (Mellado, 2007). Lo anterior coincide con Richards (1992); Álvaro *et al.* (2008) e Isidro *et al.* (2011) quienes, en sus respectivos estudios, indicaron que existe relación directa entre la disminución del largo del ciclo y la introducción de genes enanizantes debido a la presencia de un efecto pleiotrópico del gen *Rht-B1*.

El aporte de variables agronómicas y fisiológicas al aumento en rendimiento de las variedades de trigo candeal liberadas por el programa de mejoramiento chileno antes y después de la Revolución Verde se realizó considerando inicialmente que el rendimiento en grano depende de la biomasa y el IC, de esta manera se analizó el aporte de estas variables al incremento en rendimiento observado en la serie histórica de trigo candeal, donde se observó un progreso genético en rendimiento estadísticamente significativo considerando los 100 años de programa de mejoramiento genético y en el periodo post RV.

En los 100 años del programa de mejoramiento genético nacional el análisis StepWise mostró que el IC tuvo un aporte de 61% en el incremento en rendimiento, mientras que la biomasa tuvo un aporte de 37%. Esto demuestra el gran impacto del uso de genes *Rht* en la mejora del rendimiento, sin embargo, dado el análisis anterior podemos señalar que este fuerte impacto se concentra entre en el periodo previo a la RV y la primera variedad con genes enanizantes, Quilafén, liberada en 1970.

Post RV, el IC explica 21% del incremento en rendimiento y la biomasa el 78%. Dado que todas las variedades de este periodo contienen genes *Rht* los cambios en IC son menores y su aporte es bajo, lo que coincide con otros estudios (Royo *et al.*, 2007; Del Pozo *et al.*, 2019). Estos resultados son similares al trabajo de Zarei *et al.* (2011) quienes evaluaron en condición de riego líneas recombinantes de trigo candeal, encontrando que la biomasa explicó un 74% y el índice de cosecha solo un 6%, agregando más antecedentes de que el índice de cosecha, a medida que transcurren los años, pierde importancia en los avances en el rendimiento y lo difícil que es lograr variaciones importantes en este rasgo, sin embargo, aún existen posibilidades de mejorar esta variable debido a la existencia de un máximo teórico de 0,65 (Austin, 1982).

Dado que la biomasa explicó gran parte del progreso en rendimiento en el periodo post RV (78%), en una segunda etapa del análisis se consideró la expresión de Monteith (1977) para conocer el aporte a la biomasa que han hecho la sumatoria del producto entre  $PAR$  interceptado ( $PAR_i$ ) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). En este sentido el análisis StepWise detectó un aporte de la EUR de 61% y de  $\Sigma PAR_i$  de 38%.

El menor aporte de  $\Sigma PAR_i$ , no deja de llamar la atención, este depende en forma importante del largo del ciclo de desarrollo del cultivo, el cual ha sido bastante homogéneo entre los genotipos liberados en este periodo (118 días a anthesis y 163 días a madurez fisiológica en promedio), y de la proporción de luz interceptada, en el caso de trigo se logra temprano en el desarrollo del cultivo, alrededor de primer nudo, no siendo un factor muy limitante (Tardieu, 2013). La gran diferencia observada en este punto entre pre y post RV, donde post RV tiene una menor  $\Sigma PAR_i$ , explicada en parte por el menor largo de ciclo de los genotipos Post RV, y además, podría explicarse por una menor fracción de intercepción, coincide con la relación estadísticamente significativa con el año de liberación que podemos ver a lo largo de los 100 años (Figura 3, A<sub>1</sub>) y con un trabajo de Richards (1992) quien encontró que los genotipos altos interceptaban un 10% más de radiación que sus isogénicos pequeños.

La Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) o conversión de radiación interceptada a biomasa, no tuvo una relación significativa con el año de liberación de las variedades, sin embargo, si tuvo una correlación con el rendimiento post RV, es decir que existe genotipos más productivos que otros y estas diferencias se deben, entre otras variables, a un mayor EUR. Este mayor rendimiento estaría asociado a una mayor fotosíntesis que además de menores costos de respiración, se puede deber a una mayor eficiencia de carboxilación y/o mayor conductancia de CO<sub>2</sub> (Tardieu, 2013). En este sentido, para saber el motivo de la mayor fotosíntesis observada, es de mucha utilidad observar lo ocurrido con la  $\Delta^{13}\text{C}$  y la composición isotópica de  $^{18}\text{O}$ . El constante incremento de la  $\Delta^{13}\text{C}$  detectado en este periodo comienza a entregar una idea que se deba a una mayor conductancia de CO<sub>2</sub>, sin embargo, no se puede concluir que hubo mayor conductancia observando sólo a este isótopo. De esta manera, observar lo ocurrido con el  $^{18}\text{O}$  resulta útil. Dado que el  $^{18}\text{O}$  es un isótopo más pesado que el  $^{16}\text{O}$ , ante una mayor transpiración este se acumula menos en los tejidos vegetales (Barbour *et al.*, 2000), si esta fuera la explicación los valores con  $\Delta^{13}\text{C}$  se correlacionarían con los de  $^{18}\text{O}$ . La correlación entre estos isótopos estables para el periodo post RV no fue significativa ( $r = -0,53$ ;  $p = 0,22$ ;  $n = 7$ ), sin embargo, hay que tener presente que en el análisis de los 100 años si se observa una correlación significativa ente estos isótopos ( $r = -0,69$ ;  $p = 0,01$ ;  $n = 12$ ), que nos lleva a concluir que esta mayor fotosíntesis se deba a una mayor conductancia estomática. Esto último coincidiría con lo señalado por otros autores como Ferrio *et al.* (2007) y Barbour *et al.* (2000) quienes trabajaron con isótopos estables en genotipos de trigo harinero.

Por otra parte, se destaca el incremento del sumidero, especialmente  $\text{G} \cdot \text{E}^{-1}$  post RV, que a su vez impacta en el cambio de pendiente de  $\text{G} \cdot \text{m}^{-2}$ , que podría ser una de las razones del mayor aporte del EUR a la biomasa, esto debido a lo indicado por Acreche *et al.* (2009) quienes observaron una mayor EUR en genotipos modernos, lo que estaría asociado a una mejor partición hacia los órganos reproductivos. Según Stöckle y Kemanian (2009) los  $\text{G} \cdot \text{m}^{-2}$  y la EUR pudiesen estar relacionadas a través de la relación fuente-sumidero, ellos indican que el mayor número  $\text{G} \cdot \text{m}^{-2}$ , provocaría un aumento en la EUR. Ahora ¿por qué habrá aumentado  $\text{G} \cdot \text{E}^{-1}$  en el periodo post RV?, la explicación ya no puede ir por la menor competencia del crecimiento activo de la espiga con el crecimiento de la caña, lo que con llevo a un mayor de número de floretes fértiles (Youssefian *et al.*, 1992), ya que no ha habido cambios en la altura de los genotipos liberados post RV, tal vez se podría deber a un mayor largo del periodo crítico del cultivo (entre penúltima hoja y cuaja del grano) que podría permitir un aumento en el número de los floretes fértiles, tal como indicaron Miralles *et al.* (2000) y Miralles y Slafer (2007) quienes en sus respectivos estudios determinaron que una mayor duración de la fase reproductiva en trigo, desde encañado a antesis, tuvo como resultado un mayor número de flores fértiles por espiga.

## CONCLUSIONES

Previo a la RV, cuando los genotipos liberados por el programa nacional de mejoramiento de trigo candeal no contaban con genes *Rht*, no se observa progreso genético significativo en el rendimiento, sin embargo, se observa una relación de esta variable con la biomasa e índice de cosecha, las cuales explican la variación del rendimiento en un porcentaje relativamente similar. Por otra parte, se observa progreso genético en la reducción de altura y aumento en el índice de cosecha. Dado esto se rechaza la parte de la hipótesis que señala que el mayor aporte al aumento del rendimiento fue debido al aumento en el IC.

Posterior a la RV se determina un progreso genético significativo en el rendimiento de 43 kg por hectárea por cada año, observándose un aporte de la biomasa de casi 4 veces superior al del índice de cosecha. Por otra parte, la biomasa fue explicada en un 61% por la eficiencia en el uso de la radiación y en un 38% por la cantidad de radiación interceptada, de esta manera, se mantiene la parte de la hipótesis en que el mayor aumento en el rendimiento post RV se ha debido a un mayor EUR.

El índice de cosecha tiene un aporte de casi el doble de la biomasa en el aumento del rendimiento cuando se analiza en conjunto ambas etapas.

## BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, E. and Fereres, E. (1993). Resistance to abiotic stresses. En M.D. Hayward, N.O. Bosemark and I. Romagosa (Eds.). *Plant Breeding Principles and Prospects* (pp. 406-421). Chapman and Hall, London, U.K.

Acevedo Hinojosa, E. y Silva Candia, P. (2007). *Trigo candéal: calidad, mercado y zonas de cultivo*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Recuperado en: [Trigo\\_candéal.pdf \(uchile.cl\)](#)

Acreche, M., Briceño-Félix, G., Sánchez, J. and Slafer, G. (2009). Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. *Field Crops Research*, 110(2), 91-97.

Álvaro, F., Isidro, J., Villegas, D., García del Moral, L. and Royo, C. (2008). Breeding Effects on Grain Filling, Biomass Partitioning, and Remobilization in Mediterranean Durum Wheat. *Agronomy Journal*, 100(2), 361-370

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0). Recuperado en: [01-Contents \(fao.org\)](#)

Austin, R. B. (1982). Crop characteristics and the potential yield of wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 98(2), 447-453.

Chairi, F., Vergara, O., Vatter, T., Aparicio, N., Nieto-Taladriz, M.T., Kefauver, S.C., Bort, J., Serret, M.D. and Araus, J.L. (2018). Post-Green Revolution genetic advance in durum wheat: The case of Spain. *Field Crops Research*, 228, 158–169.

CIREN (Centro de información de Recursos Naturales). (1996). Estudio agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N°115. Santiago, Chile. 431p.

Barbour, M M., Fischer, R. A., Sayre, K. D. and Farquhar, G. D. (2000). Oxygen isotope ratio of leaf and grain material correlates with stomatal conductance and grain yield in irrigated wheat. *Functional Plant Biology*, 27(7), 625-637.

Del Pozo, A., Matus, I., Serret, M. D. and Araus, J. L. (2014). Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 180-189.

Del Pozo, A., Matus, I., Ruf, K., Castillo, D., Méndez-Espinoza, A. M. and Serret, M. D. (2019). Genetic Advance of Durum Wheat Under High Yielding Conditions: The Case of Chile. *Agronomy*, 9(8): 454.

De Vita, P., Li Destri, O., Nigro, F., Platani, C., Riefolo, C., di Fonzo, N. and Cattivelli, L. (2007). Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, 26: 39–53.

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M and Robledo C. (2018). InfoStat. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

Evans, L. T. (1998). *Feeding the ten billion: plants and population growth*. Cambridge University Press.

Evans L.T. and Fischer R.A. (1999). Yield potential: its definition, measurement and significance. *Crop Science*, 34: 1544–1551.

Ferrio, J., Mateo, M., Bort, J., Voltas, O., Abdalla, O. and Araus, J. (2007). Relationship of grain  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  with wheat phenology and yield under water-limited conditions. *Annals of Applied Biology*, 150 (2): 207-215.

Fischer, R.A. (2007). Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 145: 99–113.

Fischer, R. A., Byerlee, D. and Edmeades, G. (2014). *Crop yields and global food security*. ACIAR: Canberra, ACT, 8-11. Recuperado de: [Crop yields and global food security \(researchgate.net\)](#)

Hacke, E., Ramirez, I. y Moreno, O. (1986). El trigo candeal en Chile. (Bol. N°34) INIA. Santiago, Chile. 45p.

Hedden, P. (2003). The genes of the Green Revolution. *Trends in Genetics*, 19(1), 5-9.

INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). (2015). *50 años INIA 1964-2014 Liderando el desarrollo de la agricultura de Chile*. INIA. Recuperado de: [50 años INIA 1964-2014. Liderando el Desarrollo de la Agricultura en Chile](#)

Isidro, J., Álvaro F., Royo, C., Villegas, D., Miralles, D. and García, L. (2011). Changes in duration of developmental phases of durum wheat caused by breeding in Spain and Italy during the 20th century and its impact on yield. *Annals of Botany*, 107: 1355-1366.

Matus, I. y Madariaga, R. (2007). Trigos candeales en la zona centro sur. Fechas de siembra, rendimiento y calidad del grano. *Tierra Adentro* 72: 30-32.

- Mellado, M., 2007. *El Trigo en Chile, cultura, ciencia y tecnología*. INIA. Recuperado de: [El trigo en Chile, cultura, ciencia y tecnología \(inia.cl\)](http://www.inia.cl).
- Miralles, D. and Slafer, G. (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced?. *Journal of Agricultural Science*, 2007, vol. 145, 2, p. 139-149.
- Miralles, D., Richards, R. and Slafer, G. (2000). Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 27(10), 931-940.
- Monteith J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, B 281:277-294.
- Moreno, M., Ramírez, I., Gonzalez, R., Parodi, P., Hacke, E., Wolf, H. and Granger, D. (1970). Quilafén una nueva variedad de trigo candeal. *Agricultura Técnica*. 30 (2):105.
- Richards, R. A. (1992). The effect of dwarfing genes in spring wheat in dry environments. I. Agronomic characteristics. *Australian Journal of Agricultural Research*, 43(3), 517-527.
- Richards, R. (1992). The effect of dwarfing genes in spring wheat in dry environments. II. Growth, water use and water-use efficiency. *Australian Journal of Agricultural Research*, 43(3): 529-539.
- Roche, D. (2015). Stomatal conductance is essential for higher yield potential of C3 crops. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(4), 429-453.
- Royo, C., Álvaro, F., Martos, V., Ramdani, A., Isidro, J., Villegas, D. and García del Moral, L. (2007). Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica*, 155:259–270.
- Sadras, V. O. and Lawson, C. (2011). Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Crop and Pasture Science*, 62(7), 533-549.
- Santibáñez, F. y Uribe, J. (1990). Atlas agroclimático de Chile: Regiones V y RM. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agroclimatología, Departamento de Ingeniería y Suelos. 66p.
- Stöckle, C. O. and Kemanian, A. R. (2009). Crop radiation capture and use efficiency: a framework for crop growth analysis. *Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy*, 145-170.

Tardieu, F. (2013). Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. *Frontiers in physiology*, 4, 17.

ONU (Organización de Naciones Unidas. Department of Economic and Social Affairs). (2013). *World Population Prospects: The 2012 Revision, Volume II-Demographic Profiles*. Recuperado de: [Microsoft Word - WPP 2012\\_Volume II TEXT FINAL.doc \(un.org\)](#).

Youssefian, S., Kirby, E. J. M. and Gale, M. D. (1992). Pleiotropic effects of the GA-insensitive *Rht* dwarfing genes in wheat. 2. Effects on leaf, stem, ear and floret growth. *Field Crops Research*, 28(3): 191–210.

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

Zarei, L., Cheghamirza, K., and Farshadfar, E. (2011). Interrelationships of some agronomic characters of durum wheat under supplementary irrigation at grain filling stage conditions. *In Researches of the first international conference*. 9, 211-215.

Zhou, Y., He, Z. H., Sui, X. X., Xia, X. C., Zhang, X. K. and Zhang, G. S. (2007). Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000. *Crop Science*, 47(1), 245-253.

## APÉNDICES

Apéndice I. Fertilización estándar realizada en el ensayo de trigo candeal en ambas temporadas. Unidades o kilos de cada elemento por hectárea. Las 180 unidades de nitrógeno aplicadas como urea se distribuyeron en 2 aplicaciones, una a media macolla y una a término de macolla.

Fertilizantes (kg ha <sup>-1</sup> )	%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	K <sub>2</sub> O	MgO	S	B	Zn
<b>A la siembra</b>								
260 kg FDA	46 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120	20					
90 kg KCl	60% K <sub>2</sub> O,			54				
200 kg Sulpomag	22% K <sub>2</sub> O, 18% MgO y 22% de S			44	36	44		
10 kg de Boronatrocacita	11% B						1,1	
3 kg Sulfato Zn	35% Zn							1,05
<b>A la macolla</b>								
NaN <sub>3</sub>	45 % N		90					
<b>Inicio encañado</b>	45 % N		90					
Total		120	200	98	36	44	1,1	1,05

Apéndice II. Porcentaje de la suma de cuadrados del análisis de la varianza combinado para las variables rendimiento (kg·ha-1), biomasa (kg·ha-1), índice de cosecha, altura, granos·m-2, peso seco 1000 granos, espigas·m-2, granos·espiga-1, días a antesis, días a madurez fisiológica y días de llenado de grano en ambas temporadas previo a la Revolución Verde.

%SC											
Fuentes de variación	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	G·m2	PS1000	E·m2	G·E	DA	DMF	DLLG
Año	3,76	38,49	9,09	1,88	0,65	1,15	29,29	24,68	88,92	63,29	54,47
Variedad	48,27	36,61	54,55	74,62	65,48	87,72	63,82	23,58	9,71	30,09	35,73
Variedad*Año	47,97	24,90	36,36	23,50	33,87	11,13	6,89	51,74	1,37	6,62	9,79
P-value											
Año	0,3873	≤0,05	≤0,1	≤0,05	0,6131	0,2394	≤0,05	≤0,05	≤0,001	≤0,001	≤0,001
Variedad	≤0,1	≤0,1	≤0,001	≤0,001	≤0,05	≤0,001	≤0,001	0,408	≤0,001	<0,0001	≤0,001
Variedad*Año	≤0,1	0,2443	≤0,05	≤0,001	≤0,1	0,2048	0,6506	≤0,05	0,3368	0,2122	0,1396

Apéndice III. Porcentaje de la suma de cuadrados del análisis de la varianza combinado para las variables rendimiento (kg·ha-1), biomasa (kg·ha-1), índice de cosecha, altura, granos·m-2, peso seco 1000 granos, espigas·m-2, granos·espiga-1, días a antesis, días a madurez fisiológica y días de llenado de grano en ambas temporadas posterior a la Revolución Verde.

%SC											
Fuentes de variación	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	G·m2	PS1000	E·m2	G·E	DA	DMF	DLLG
Año	26,34	18,60	12,50	23,73	2,74	37,54	51,56	17,17	84,38	16,28	70,99
Variedad	54,26	63,37	50,00	47,78	67,22	46,74	35,89	37,93	9,59	63,93	13,99
Variedad*Año	19,40	18,03	37,50	28,49	30,04	15,72	12,55	44,90	6,03	19,79	15,02
P-value											
Año	≤0,01	≤0,05	0,2181	≤0,05	0,3435	≤0,05	≤0,1	0,2748	≤0,001	0,1116	≤0,01
Variedad	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,01	≤0,1	≤0,05	≤0,001	≤0,01	≤0,05
Variedad*Año	0,2315	0,271	≤0,05	<0,0001	≤0,05	0,2869	0,6909	≤0,05	≤0,05	0,4517	≤0,05

Apéndice IV. Matriz de correlación de Pearson de las variables agronómicas. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas de los 18 genotipos de trigo candeal liberados entre los años 1915 a 2015 (n= 18 para variables agronómicas, n= 12 para variables fisiológicas).

	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	G·m <sup>2</sup>	PS100 0	E·m <sup>2</sup>	G·E	DA	DMF	DLLG	ΣPARI	EUR	Δ <sup>13</sup> C	δ18O
Rendimiento	1	0,96	≤0,001	≤0,01	≤0,001	0,38	≤0,01	≤0,001	≤0,1	≤0,1	0,45	≤0,05	≤0,01	≤0,01	≤0,01
Biomasa	-0,01	1	≤0,01	≤0,01	0,65	0,16	0,34	0,45	≤0,05	≤0,01	0,14	≤0,01	≤0,05	0,12	0,15
IC	0,78	-0,63	1	≤0,001	≤0,001	0,12	≤0,01	≤0,05	≤0,01	≤0,001	0,12	≤0,001	0,55	≤0,01	≤0,01
Altura	-0,64	0,71	-0,93	1	≤0,001	≤0,05	≤0,001	0,19	≤0,001	≤0,001	0,16	≤0,001	0,64	≤0,01	≤0,001
Granos·m <sup>2</sup>	0,92	-0,11	0,77	-0,71	1	≤0,01	≤0,001	≤0,001	≤0,05	≤0,05	0,18	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,001
PS1000	-0,22	0,35	-0,38	0,53	-0,58	1	≤0,01	0,51	≤0,1	≤0,05	0,15	≤0,01	0,28	0,12	≤0,05
Espigas·m <sup>2</sup>	0,7	-0,24	0,67	-0,76	0,84	-0,69	1	0,18	≤0,001	≤0,01	0,41	≤0,001	≤0,05	≤0,05	≤0,001
Granos·espiga <sup>-1</sup>	0,82	0,19	0,53	-0,33	0,78	-0,17	0,33	1	0,97	0,54	0,28	0,34	≤0,05	≤0,05	≤0,05
DA	-0,41	0,55	-0,66	0,76	-0,47	0,45	-0,73	0,01	1	≤0,001	0,79	≤0,001	0,39	0,35	≤0,01
DMF	-0,42	0,63	-0,73	0,78	-0,56	0,56	-0,68	-0,15	0,8	1	≤0,01	≤0,001	0,15	≤0,1	≤0,05
DLLG	-0,19	0,36	-0,38	0,35	-0,33	0,35	-0,21	-0,27	0,07	0,65	1	≤0,01	0,2	0,24	0,88
ΣPARI	-0,49	0,64	-0,78	0,84	-0,64	0,61	-0,74	-0,24	0,79	0,97	0,62	1	0,12	≤0,05	≤0,01
EUR	0,56	0,47	0,15	-0,12	0,6	-0,27	0,56	0,52	-0,22	-0,35	-0,32	-0,38	1	0,63	0,49
Δ <sup>13</sup> C	-0,74	0,48	-0,76	0,81	-0,75	0,47	-0,66	-0,57	0,3	0,55	0,37	0,65	-0,15	1	≤0,01
δ18O	0,78	-0,44	0,79	-0,85	0,84	-0,62	0,87	0,58	-0,71	-0,57	0,05	-0,72	0,22	-0,69	1

Apéndice V. Matriz de correlación de Pearson de las variables agronómicas. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas de 8 genotipos de trigo candeal liberados entre los años 1915 a 1964 (n= 8 para variables agronómicas, n= 5 para variables fisiológicas).

	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	G·m <sup>2</sup>	PS1000	E·m <sup>2</sup>	G-E	DA	DMF	DLLG	ΣPARi	EUR	Δ <sup>13</sup> C	δ18O
Rendimiento	1	0,7	≤0,1	0,88	≤0,1	0,88	0,57	≤0,1	0,79	0,59	0,46	0,75	0,86	0,26	0,22
Biomasa	0,16	1	≤0,1	≤0,05	0,76	0,45	0,46	0,25	0,35	≤0,05	0,39	≤0,1	≤0,1	0,23	0,23
IC	0,65	-0,64	1	≤0,1	≤0,1	0,45	0,27	0,78	0,34	0,34	0,95	0,29	0,31	0,17	0,12
Altura	-0,07	0,76	-0,67	1	0,11	≤0,05	≤0,05	0,4	≤0,1	≤0,05	0,77	≤0,01	0,79	0,23	≤0,05
Granos·m <sup>2</sup>	0,68	-0,13	0,64	-0,6	1	≤0,05	≤0,05	0,57	0,25	0,37	0,9	0,19	0,37	0,17	≤0,1
PS1000	-0,06	0,31	-0,31	0,77	-0,78	1	≤0,01	0,57	0,14	≤0,1	0,71	≤0,01	0,28	0,33	0,2
Espigas·m <sup>2</sup>	0,24	-0,31	0,45	-0,77	0,8	-0,9	1	0,37	≤0,05	≤0,1	0,8	≤0,05	0,38	0,43	≤0,05
Granos·espiga <sup>-1</sup>	0,62	0,47	0,12	0,35	0,24	0,24	-0,37	1	0,25	0,13	0,73	0,23	0,76	0,49	0,24
DA	-0,11	0,38	-0,39	0,67	-0,46	0,56	-0,8	0,46	1	0,38	0,19	0,14	0,93	0,99	≤0,05
DMF	0,23	0,73	-0,39	0,75	-0,37	0,69	-0,62	0,59	0,36	1	0,11	≤0,001	0,96	≤0,05	0,38
DLLG	0,3	0,35	-0,02	0,12	0,05	0,16	0,11	0,15	-0,52	0,61	1	0,35	0,97	0,2	0,49
ΣPARi	0,14	0,69	-0,43	0,87	-0,52	0,83	-0,76	0,48	0,57	0,94	0,38	1	0,76	0,13	0,18
EUR	0,08	0,63	-0,41	0,11	0,37	-0,44	0,36	0,13	-0,04	-0,02	0,02	-0,13	1	0,64	0,98
Δ <sup>13</sup> C	-0,62	0,66	-0,73	0,66	-0,72	0,56	-0,47	-0,41	0,0041	0,88	0,68	0,76	-0,29	1	0,55
δ18O	0,67	-0,66	0,77	-0,91	0,82	-0,69	0,93	-0,65	-0,91	-0,51	0,41	-0,71	0,02	-0,36	1

Apéndice VI. Matriz de correlación de Pearson de las variables agronómicas. Los valores corresponden al promedio de ambas temporadas de 10 genotipos de trigo candeal liberados entre los años 1970 a 2014.

	Rendimiento	Biomasa	IC	Altura	G·m <sup>2</sup>	PS1000	E·m <sup>2</sup>	G-E	DA	DMF	DLLG	ΣPARI	EUR	Δ <sup>13</sup> C	δ18O
Rendimiento	1	≤0,001	0,41	0,14	≤0,001	0,66	≤0,05	≤0,01	0,32	0,53	0,9	0,7	≤0,05	0,43	≤0,1
Biomasa	0,88	1	0,61	≤0,05	≤0,01	0,77	≤0,01	≤0,05	0,53	0,48	0,71	0,48	≤0,01	0,47	0,27
IC	0,29	-0,18	1	0,27	0,51	0,72	0,41	0,18	0,54	0,76	0,25	0,46	0,91	0,79	0,66
Altura	0,5	0,73	-0,39	1	0,13	0,7	0,18	0,2	0,8	0,67	0,72	0,58	≤0,1	0,76	0,97
Granos·m <sup>2</sup>	0,89	0,79	0,24	0,51	1	0,38	≤0,05	≤0,001	0,33	0,86	0,44	0,97	≤0,01	0,47	≤0,1
PS1000	0,16	0,11	0,13	-0,14	-0,31	1	0,7	0,56	0,92	0,34	0,18	0,36	0,69	0,82	0,26
Espigas·m <sup>2</sup>	0,63	0,78	-0,3	0,46	0,67	-0,14	1	0,33	0,63	0,59	0,79	0,62	≤0,01	0,36	0,2
Granos·espiga <sub>1</sub>	0,85	0,65	0,46	0,44	0,91	-0,21	0,34	1	≤0,1	0,6	0,38	0,84	≤0,1	0,77	0,15
DA	0,35	0,22	0,22	0,09	0,34	0,03	-0,17	0,55	1	≤0,1	1	≤0,1	0,77	0,37	0,96
DMF	0,22	0,26	-0,11	0,16	0,06	0,34	-0,19	0,19	0,74	1	≤0,1	≤0,001	0,31	0,24	0,97
DLLG	-0,05	0,13	-0,4	0,13	-0,28	0,46	-0,1	-0,31	0,0023	0,68	1	≤0,1	0,23	0,6	0,93
ΣPARI	0,14	0,25	-0,26	0,2	-0,01	0,32	-0,18	0,07	0,56	0,95	0,79	1	0,25	0,52	0,78
EUR	0,72	0,78	-0,04	0,59	0,75	-0,14	0,85	0,56	-0,1	-0,36	-0,42	-0,4	1	0,86	0,42
Δ <sup>13</sup> C	-0,35	-0,33	0,12	0,15	-0,33	0,11	-0,41	-0,14	-0,4	-0,52	-0,24	-0,3	-0,09	1	0,22
δ18O	0,68	0,48	0,2	-0,02	0,72	-0,49	0,55	0,61	0,02	-0,02	-0,04	-0,13	0,36	-0,53	1

Apéndice VII. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla al rendimiento como el producto entre la biomasa y el índice de cosecha de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas en el continuo de 100 años.

Regresión stepwise

> **RLM.Stepwise**<-step(**RLM.Vacio**, scope=

**list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo)**, direction = "botl

Start: AIC=250.01

Rendimiento ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
IC	1	10574570	6766335	235.07
<none>			17340905	250.01
Biomasa	1	3130	17337775	252.00

Step: AIC=235.07

Rendimiento ~ IC

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Biomasa	1	6427523	338812	183.17
<none>			6766335	235.07
IC	1	10574570	17340905	250.01

Step: AIC=183.17

Rendimiento ~ IC + Biomasa

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			338812	183.17
Biomasa	1	6427523	6766335	235.07
IC	1	16998963	17337775	252.00

> **summary (RLM.Stepwise)**

Call: lm(formula = Rendimiento ~ IC + Biomasa, data = BIO\_IC)

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-306.89	-33.12	41.23	57.74	219.68

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-7.155 e+03	5.754 e+02	-12.43	2.66e-09 ***
IC	1.844 e+04	6.723 e+02	27.43	3.11e-14 ***
Biomasa	3.817 e-01	2.263 e-02	16.87	3.66e-11 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 150.3 on 15 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.98 Adjusted R-squared: 0.97

F-statistic: 376.4 on 2 and 15 DF, p-value: 1.519e-13

> **anova(RLM.Stepwise)**

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
IC	1	10574570	10574570	468.16	1.006e-12 ***
Biomasa	1	6427523	6427523	284.56	3.660e-11 ***
Residuals	15	338812	22587		

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Apéndice VIII. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla al rendimiento como el producto entre la biomasa y el índice de cosecha de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas previo a la Revolución Verde.

Regresión stepwise

> **RLM.Stepwise**<-step(**RLM.Vacio**, scope=

**list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo)**, direction = "both")

Start: AIC=101.05

Rendimiento ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
IC	1	808804	1096668	98.627
<none>			1905472	101.046
Biomasa	1	49097	1856375	102.838

Step: AIC=98.63

Rendimiento ~ IC

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Biomasa	1	1072395	24273	70.142
<none>			1096668	98.627
IC	1	808804	1905472	101.046

Step: AIC=70.14

Rendimiento ~ IC + Biomasa

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			24273	70.142
Biomasa	1	1072395	1096668	98.627
IC	1	1832102	1856375	102.838

> **summary (RLM.Stepwise)**

Call: lm(formula = Rendimiento ~ IC + Biomasa, data = BIO\_IC)

Residuals:

	1	2	3	4	5	6	7	8
	94.953	-93.739	-8.042	-10.183	39.588	46.946	-27.211	-42.311

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-6,43E+07	6,33E+06	-10.17	0.000158 ***
IC	2,03E+08	1,04E+07	19.43	6.67e-06 ***
Biomasa	0.3121	0.0210	14.86	2.49e-05 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 69.68 on 5 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.99 Adjusted R-squared: 0.98

F-statistic: 193.8 on 2 and 5 DF, p-value: 1.832e-05

> **anova(RLM.Stepwise)**

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
IC	1	808804	808804	166.6	5,E-02 ***
Biomasa	1	1072395	1072395	220.9	2,E-02 ***
Residuals	5	24273	4855		

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Apéndice IX. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla al rendimiento como el producto entre la biomasa y el índice de cosecha de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas posterior a la Revolución Verde.

Regresión stepwise

```
> RLM.Stepwise<-step(RLM.Vacio, scope=
list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo), direction = "both")
```

Start: AIC=135.34

Rendimiento ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Biomasa	1	4827708	1352689	122.15
<none>			6180397	135.34
IC	1	531911	5648486	136.44

Step: AIC=122.15

Rendimiento ~ IC

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
IC	1	1318484	34205	87.375
<none>			1352689	122.150
Biomasa	1	4827708	6180397	135.343

Step: AIC=87.38

Rendimiento ~ IC + Biomasa

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			34205	87.375
IC	1	1318484	1352689	122.150
Biomasa	1	5614281	5648486	136.443

> summary (RLM.Stepwise)

Call: lm(formula = Rendimiento ~ IC + Biomasa, data = BIO\_IC)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-115.203	-5.485	3.894	41.854	64.919

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	-6,73E+06	4,92E+05	-13.67	2.64e-06	***
IC	4,22E+02	1,24E+01	33.90	5.04e-09	***
Biomasa	1,59E+07	9,70E+05	16.43	7.56e-07	***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 69.9 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.99 Adjusted R-squared: 0.99

F-statistic: 628.9 on 2 and 7 DF, p-value: 1.261e-08

> anova(RLM.Stepwise)

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Biomasa	1	4827708	4827708	987.98	9,E-06	***
IC	1	1318484	1318484	269.83	8,E-04	***
Residuals	7	34205	4886			

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Apéndice X. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla a la biomasa como el producto entre la sumatoria de *PAR* interceptado y el EUR de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas en el continuo de 100 años.

Regresión stepwise

> **RLM.Stepwise**<-step(**RLM.Vacio**, scope=

**list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo)**, direction = "both")

Start: AIC= 275.74

Biomasa ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Sum_PARi	1	29459462	42990502	268.35
EUR	1	15733719	56716245	273.34
<none>			72449964	275.75

Step: AIC=268.35

Biomasa ~ Sum\_PARi

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
EUR	1	42048165	942337	201.58
<none>			42990502	268.35
Sum_PARi	1	29459462	72449964	275.75

Step: AIC=201.58

Biomasa ~ Sum\_PARi + EUR

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			942337	201.58
EUR	1	42048165	42990502	268.35
Sum_PARi	1	55773908	56716245	273.34

> **summary (RLM.Stepwise)**

Call: lm(formula = Biomasa ~ Sum\_PARi + EUR, data = Monteith\_final )

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-453.6	-210.0	121.2	156.6	258.3

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-1,62E+07	9,88E+05	-16.38	5.57e-11 ***
Sum_PARi	2,32E+04	7,79E+02	29.80	9.20e-15 ***
EUR	6,81E+06	2,63E+05	25.87	7.36e-14 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 250.6 on 15 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.99 Adjusted R-squared: 0.99

F-statistic: 569.1 on 2 and 15 DF, p-value: 7.182e-15

> **anova(RLM.Stepwise)**

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sum_PARi	1	29459462	29459462	468.93	9.942e-13 ***
EUR	1	42048165	42048165	669.32	7.365e-14 ***
Residuals	15	942337	62822		

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Apéndice XI. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla a la biomasa como el producto entre la sumatoria de *PAR* interceptado y el EUR de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas previo a la Revolución Verde.

Regresión stepwise

```
> RLM.Stepwise<-step(RLM.Vacio, scope=
list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo), direction = "both")
```

Start: AIC= 119.28

Biomasa ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Sum_PARi	1	8819880	9789077	116.14
EUR	1	7289073	11319884	117.30
<none>			18608957	119.28

Step: AIC=116.14

Biomasa ~ Sum\_PARi

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
EUR	1	9721657	67420	78.314
<none>			9789077	116.139
Sum_PARi	1	8819880	18608957	119.278

Step: AIC=78.31

Biomasa ~ Sum\_PARi + EUR

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			67420	78.314
EUR	1	9721657	9789077	116.139
Sum_PARi	1	11252464	11319884	117.301

> summary (RLM.Stepwise)

Call: lm(formula = Biomasa ~ Sum\_PARi + EUR, data = Monteith\_final)

Residuals:

1	2	3	4	5	6	7	8
17.655	-58.532	168.363	-9.308	36.809	-183.029	13.078	14.964

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-2,05E+07	1,04E+06	-19.64	6.32e-06 ***
Sum_PARi	2,42E+04	8,36E+02	28.89	9.31e-07 ***
EUR	8,45E+06	3,15E+05	26.85	1.34e-06 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 116.1 on 5 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.99 Adjusted R-squared: 0.99

F-statistic: 687.5 on 2 and 5 DF, p-value: 7.901e-07

> anova(RLM.Stepwise)

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sum_PARi	1	8819880	8819880	654.10	1.706e-06 ***
EUR	1	9721657	9721657	720.98	1.340e-06 ***
Residuals	5	67420	13484		

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Apéndice XII. Resultado de método de selección StepWise, para el modelo que contempla a la biomasa como el producto entre la sumatoria de *PAR* interceptado y el EUR de las variedades de trigo candeal en el promedio de ambas temporadas posterior a la Revolución Verde.

Regresión stepwise

```
> RLM.Stepwise<-step(RLM.Vacio, scope=
list(lower=RLM.Vacio,upper=RLM.Completo), direction = "both")
```

Start: AIC= 152

Biomasa ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
EUR	1	19818594	12864923	144.67
<none>			32683517	152.00
Sum_PARi	1	2091500	30592017	153.34

Step: AIC=144.67

Biomasa ~ EUR

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
Sum_PARi	1	12472109	392813	111.78
<none>			12864923	144.67
EUR	1	19818594	32683517	152.00

Step: AIC=111.79

Biomasa ~ EUR + Sum\_PARi

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			392813	111.78
Sum_PARi	1	12472109	12864923	144.67
EUR	1	30199203	30592017	153.34

```
> summary (RLM.Stepwise)
```

Call: lm(formula = Biomasa ~ EUR + Sum\_PARi, data = Monteith\_final)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-356.09	-128.73	0.95	81.57	409.74

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-1,43E+07	1,43E+06	-9.999	2.14e-05 ***
EUR	6,46E+06	2,78E+05	23.198	7.02e-08 ***
Sum_PARi	2,17E+04	1,46E+03	14.908	1.47e-06 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 236.9 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.988 Adjusted R-squared: 0.9845

F-statistic: 287.7 on 2 and 7 DF, p-value: 1.903e-07

```
> anova(RLM.Stepwise)
```

Analysis of Variance Table

Response: Rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
EUR	1	19818594	19818594	353.17	3.001e-07 ***
Sum_PARi	1	12472109	12472109	222.25	1.465e-06 ***
Residuals	7	392813	56116		

---

Signif. Codes: : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

