

**IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE VARIABLES ASOCIADAS CON LA  
SUSCEPTIBILIDAD AL VUELCO EN TRIGO PAN EN EL SUDESTE BONAERENSE**

**Nadia Estefanía Mirabella**

Trabajo de tesis para ser presentado como requisito para optar al  
Título de MAGISTER SCIENTIAE en Producción Vegetal

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

**Balcarce, Argentina**

**Marzo 2016**

**IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE VARIABLES ASOCIADAS CON LA  
SUSCEPTIBILIDAD AL VUELCO EN TRIGO PAN EN EL SUDESTE BONAERENSE**

**Nadia Estefanía Mirabella**

-----  
Dr., M. Sc., Ing. Agr. Pablo Eduardo Abbate  
Director

-----  
Dr., Ing. Agr. Ana Clara Pontaroli  
Co- Directora

-----  
Dr., M. Sc., Ing. Agr. Laura Lázaro  
Asesora

**IDENTIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE VARIABLES ASOCIADAS CON LA  
SUSCEPTIBILIDAD AL VUELCO EN TRIGO PAN EN EL SUDESTE BONAERENSE**

**Nadia Estefanía Mirabella**

**Aprobada por:**

-----  
M.Sc., Ing. Agr. Celsa N. Balbi  
Evaluador

-----  
Dra., Ing. Agr. Betina C. Kruk  
Evaluador

-----  
M.Sc., Ing. Agr. José L. Bodega  
Evaluador

## DEDICATORIA

A mi familia, con mucho cariño.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Pablo por su orientación para el estudio de este fenómeno, el análisis de datos y dedicación a este trabajo.

A Ana Clara por ser una gran guía a nivel académico y personal.

A todo el Grupo Trigo Balcarce de la EEA INTA Balcarce por su compañía y por haber brindado los recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto. También agradezco a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, ya que este proyecto se realizó en el marco de una Beca de Estudio.

A mi familia y amigos por su contención y acompañamiento durante todo este período, especialmente a Juan Manuel y a María Pía.

Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que hayan colaborado directa o indirectamente con la realización de este trabajo; especialmente a Laura Lázaro y a los evaluadores que, con sus correcciones contribuyeron a mejorar la claridad y calidad de este manuscrito.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1.	Descripción y causas del vuelco en el cultivo de trigo .....	11
1.2.	Efectos del vuelco sobre el rendimiento en grano del cultivo de trigo .....	12
1.3.	Condiciones climáticas asociadas al vuelco en el cultivo de trigo .....	12
1.4.	Características de la planta de trigo asociadas al vuelco .....	13
1.5.	Aspectos mecánicos del vuelco en trigo.....	14
1.5.1.	Modelos predictivos de vuelco en trigo.....	15
1.6.	Estrategias para evitar el vuelco en trigo.....	17
1.7.	Estudio del fenómeno de vuelco en trigo a nivel local .....	18
1.8.	Hipótesis y objetivos .....	19
1.8.1.	Hipótesis .....	19
1.8.2.	Objetivo general.....	20
1.8.1.	Objetivos particulares .....	20
2.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
2.1.	Caracterización climática de los ciclos agrícolas .....	21
2.2.	Caracterización de los cultivares por su susceptibilidad al vuelco.....	21
2.3.	Evaluación de variables a nivel de parcela y en vástagos individuales .....	22
2.4.	Evaluación y validación de modelos explicativos del vuelco .....	25
2.5.	Evaluación de diferentes condiciones de cultivo.....	26
3.	RESULTADOS .....	27
3.1.	Clima .....	27
3.2.	Comportamiento de los cultivares seleccionados .....	28
3.3.	Variables evaluadas a nivel de parcela y de vástagos individuales.....	28
3.3.1.	Asociación entre variables .....	29
3.3.2.	Modelos explicativos del vuelco.....	31
3.4.	Experimento con diferentes condiciones de manejo.....	36
4.	DISCUSIÓN.....	38
5.	CONCLUSIONES .....	45
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de vuelco; (a) esquema de una planta de trigo en su posición vertical normal, (b) planta volcada debido al quiebre o deformación del tallo; (c) vuelco por descalce (adaptado de Berry et al., 2002). .....	12
Figura 2. Esquema de un tallo de trigo analizado como una viga empotrada en el suelo. $L_e$ =longitud de espiga; $L_t$ = longitud de tallo; X= altura del centro de gravedad; P=fuerza externa aplicada sobre el vástago. ....	14
Figura 3. Parámetros geométricos de la sección transversal del tallo, determinados en las fotografías. (izq) ÁREA.INT, D.FERET.INT.MÍN y D.FERET.INT.MAX. (centro) PERÍMETRO, ÁREA.EXT y D.FERET.EXT.MÍN y D.FERET.EXT.MAX.(derecha) EPEB. ....	24
Figura 4. Dinamómetro utilizado para registrar la fuerza de quiebre. ....	24
Figura 5. Relación entre el desvío del índice de vuelco ( $\Delta IV$ ) y el desvío del coeficiente de seguridad del tallo ( $\Delta CS$ ) de los cultivares evaluados. ....	31
Figura 6. Relación entre el desvío del índice de vuelco ( $\Delta IV$ ) y el desvío del coeficiente de seguridad del tallo de los cultivares evaluados ( $\Delta V_{gs}$ ). ....	31
Figura 7. Variación en riesgo de vuelco, calculado como velocidad de ráfaga que produciría la falla del tallo ( $V_{gs}$ ), debida a la variación en variables medidas en planta y/o en la base del tallo. A: ALTURA; B: PS/ESP; C: EPEB; D: D.EXT.MAX.C; E: RQ. ....	32
Figura 8. Comparación de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre el grado de susceptibilidad al vuelco y las variables analizadas. La línea gris indica el $R^2$ significativo al 5%, la flecha indica la variable incluida en cada paso de la regresión lineal múltiple. (A) Primera variable incorporada al modelo lineal; (B) A partir de la retención de la variable ALTURA, segunda variable incorporada al modelo; (C) A partir de la retención de la ALTURA y el PS/ESP, tercera variable incorporada al modelo. ....	34
Figura 9. Relación entre el $\Delta IV$ observado y el $\Delta IV$ estimado mediante la Ec. [12], de los 14 cultivares utilizados para generar el modelo por regresión lineal múltiple.....	35
Figura 10. Relación entre el $\Delta IV$ observado y el $\Delta IV$ estimado mediante la Ec. [12] de los cultivares utilizados para validar el modelo. ....	36
Figura 11. Evolución histórica de (A) la altura de planta (cm) y (B) el rendimiento en grano (tn) en la RET Balcarce. ....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cultivares evaluados, origen, año de inscripción y experimentos en los que fueron incluidos. ....	22
Tabla 2. Descripción de las variables evaluadas y unidades de medición utilizadas...	23
Tabla 3. Valores de temperatura media, radiación fotosintéticamente activa, precipitación + riego y evapotranspiración potencial de trigo en Balcarce durante los ciclos de cultivo 2010/11, 2011/12 y 2013/14, y sus respectivos promedios históricos (1970-2014). ....	27
Tabla 4. Índice de vuelco porcentual, expresado como desvío del promedio de cada cultivar con respecto al promedio general de cada experimento. ....	28
Tabla 5. Nivel de significación de los efectos de genotipo, ambiente e interacción genotipo x ambiente (según ANVA); media, mínimo y máximo, y coeficiente de variación porcentual (CV%) para los experimentos BAT10 y BAT11, de cada uno de los caracteres medidos o calculados. La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2. ....	29
Tabla 6. Coeficientes de correlación entre las variables evaluadas. Los valores en negrita denotan asociaciones significativas ( $p < 0,05$ ). La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2. ....	30
Tabla 7. Valores de PSG, Altura, PS/ESP, $J_x$ , D.EXT.MAX.C, EPEB y RQ de los cultivares utilizados para generar el modelo, expresados como desvíos del promedio, y promedio general. ....	33
Tabla 8. Valores de $\Delta IV$ , $\Delta PSG$ , $\Delta \text{Altura}$ , $\Delta \text{PS/ESP}$ , $\Delta J_x$ , $\Delta RQ$ y $\Delta V_{gs}$ de los cultivares utilizados para validar el modelo propuesto (Ec. [12]). ....	35
Tabla 9. Efecto de las condiciones de manejo del experimento BM13 sobre el rendimiento (PSG), la altura del cultivo (ALTURA), el diámetro de la base del tallo (D.EXT.MAX.C), el peso seco/espiga (PS/ESP) y el índice de vuelco (IV) estimado. La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2. ....	37



## RESUMEN

El vuelco es la pérdida de la posición vertical normal de los tallos y uno de los obstáculos para el alcance del rendimiento potencial en trigo pan, por lo que es necesario generar variedades de buen comportamiento. Para que la resistencia al vuelco pueda ser considerada en el mejoramiento genético sería deseable conocer qué caracteres de la planta se asocian al mismo y pueden ser evaluados fácilmente, aún en ausencia de condiciones predisponentes para su ocurrencia. Sin embargo, la información disponible se ha generado con cultivares extranjeros y en ambientes distintos a los del sudeste bonaerense y no son siempre consistentes. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estimar la susceptibilidad al vuelco en trigo pan por medio de variables de fácil medición que permitan comparar materiales genéticos bajo diferentes condiciones ambientales en el sudeste bonaerense. El vuelco es un fenómeno que se presenta esporádicamente, producto de la interacción cultivo x suelo x clima. Por ello es difícil caracterizar el comportamiento de los cultivares y el efecto de las prácticas de manejo. En este trabajo se caracterizó la susceptibilidad al vuelco de un conjunto de 24 cultivares difundidos en la región pampeana. Además, se validó un modelo teórico propuesto en la bibliografía ( $R^2=0,72$ ) y se obtuvo por regresión lineal múltiple un modelo con mejor ajuste para explicar la susceptibilidad al vuelco en condiciones de alta tecnología con variables registradas en madurez ( $R^2=0,91$ ). La altura explicó el 50% de la variación en susceptibilidad al vuelco de los cultivares. En el segundo modelo, las variables altura y peso seco de la espiga estuvieron positivamente asociadas con la susceptibilidad al vuelco, en tanto que el segundo momento de inercia de la sección del entrenudo basal presentó una asociación negativa. Un aumento del diámetro de tallo aumentaría la resistencia del tallo por estar asociado con esta última variable, en tanto que aumentos en el espesor de pared del tallo no tendrían efecto significativo. Las prácticas de manejo afectaron el rendimiento en grano, la altura de planta y la resistencia material del tallo, en tanto que las variables espesor de pared y diámetro del entrenudo basal presentaron efecto del cultivar. Los resultados obtenidos indican que es más adecuado reducir la susceptibilidad al vuelco por medio del mejoramiento genético que a través del manejo del cultivo. Un ideotipo de menor susceptibilidad al vuelco debería tener menor altura, menor rendimiento por espiga, y un mayor diámetro de tallo. Asimismo, cuando el vuelco se produce esporádicamente el ideotipo también debería presentar mayor número de espigas/m<sup>2</sup> para compensar la reducción en el rendimiento por espiga.

Palabras clave: mejoramiento genético, índice de vuelco, modelo lineal, cultivares argentinos, altura, resistencia del tallo

## ABSTRACT

Lodging is the displacement of plant stems from their vertical position and one of the obstacles for reaching yield potential in bread wheat; therefore, the development of lodging resistant varieties is required. In order to include lodging resistance as a selection criterion in the breeding process, it would be necessary to identify which plant traits are associated to lodging and are amenable to an easy and rapid screening, even under no lodging. Many lodging studies are available but they show contrasting results, and they have been carried out with foreign cultivars and under different environmental conditions than those occurring in Balcarce. The aim of this study was to estimate lodging susceptibility in locally released cultivars by using easily measurable traits under different management conditions in the Southeast Pampas region. Lodging is a complex phenomenon caused by the interaction between the wheat crop, soil and weather, so it is difficult to characterize the cultivar and management effects on lodging susceptibility. In this work, a set of 24 wheat varieties sown in the Pampas region was characterized by their lodging susceptibility. In addition, a theoretical model proposed by the literature was validated ( $R^2= 0.72$ ) and, in addition, an empirical, multiple linear regression model was obtained which showed a better fit to explain lodging susceptibility under high input conditions with easily measured traits registered at maturity ( $R^2= 0.91$ ). Plant height explained 50% of the variation in lodging susceptibility. In the second model, plant height and spike dry weight were positively associated with lodging susceptibility, whereas the second moment of inertia of the basal internode section showed a negative association. The latter variable was associated with stem diameter; hence, an increase in this variable may increase stem strength, while increases in wall thickness should not have a significant effect on stem strength. Crop management practices affected plant height and stem material resistance, while internode wall thickness and basal diameter showed cultivar effect. Results suggest that improvement of lodging tolerance would be easier achieved through breeding than by modifying crop management practices. A lodging tolerant wheat ideotype should have reduced height and spike dry weight, combined with an increased spike number/m<sup>2</sup> and basal diameter.

Key words: breeding, lodging Index, linear model, Argentinean cultivars, height

## 1. INTRODUCCIÓN

El trigo pan (*Triticum aestivum* L.) es el principal cereal de invierno cultivado en Argentina. El objetivo central del mejoramiento genético de este cultivo es el incremento del rendimiento en grano por unidad de superficie, pero uno de los obstáculos para el alcance del rendimiento potencial en sistemas de alta producción es el riesgo de vuelco, incluso en cultivares portadores de genes de enanismo. (Abbate *et al.*, 1998a; Abbate, 2007). El vuelco o acamado es la pérdida de la posición vertical normal de los tallos. La susceptibilidad al vuelco es una característica indeseable ya que puede disminuir el rendimiento por reducir la tasa fotosintética del cultivo, deteriorar la calidad del grano por aumento de infecciones fúngicas o al menos bajar la eficiencia de cosecha (Pinthus, 1973; Berry *et al.*, 2004; Berry *et al.*, 2007; Berry y Spink, 2012).

Por otra parte, si el rendimiento potencial de trigo se incrementa, esto debería complementarse con una mejora en la capacidad de anclaje de la planta, ya que el aumento de la biomasa total o de la partición de asimilados destinados al grano (índice de cosecha) puede aumentar el riesgo de vuelco (Reynolds *et al.*, 2012).

Se ha observado que muchas variedades argentinas de trigo pan presentan riesgo de vuelco, ya sea por condiciones climáticas favorables (como abundancia de precipitaciones y/o viento) o por ser cultivadas bajo condiciones de alta disponibilidad de recursos, como dosis elevadas de fertilizantes y riego complementario (Abbate, 2007).

### 1.1. Descripción y causas del vuelco en el cultivo de trigo

El vuelco es un fenómeno complejo, que resulta de interacciones planta-suelo-clima y es afectado también por prácticas agronómicas (Pinthus, 1973; Berry *et al.*, 2003a). El vuelco puede producirse por quiebre o deformación de los entrenudos del tallo o por el descalce de la planta (Pinthus, 1973; Figura 1).

En los casos de vuelco por quiebre o deformación del tallo, las raíces están fijas al suelo y la fuerza del viento sobre la canopia sumada a la eventual carga del agua de lluvia, dobla los entrenudos basales del tallo. Este tipo de vuelco se presenta con condiciones que producen entrenudos elongados y finos, como alta disponibilidad de nitrógeno y agua, alta densidad de plantas y baja radiación. Por otra parte, el vuelco por descalce de plantas se produce por una reducción en la capacidad de anclaje del sistema radical, debido a suelos livianos o a poco crecimiento de las raíces. La fuerza de anclaje de las raíces de los cereales es menor en suelos húmedos o con bajo

contenido de arcillas. Berry *et al.* (2003b) encontraron una baja asociación entre vuelco por descalce de plantas y aquél debido al quiebre de los entrenudos basales, lo que puede ser explicado por la baja correlación genética entre los caracteres que determinan la resistencia del tallo y el anclaje de la raíz.

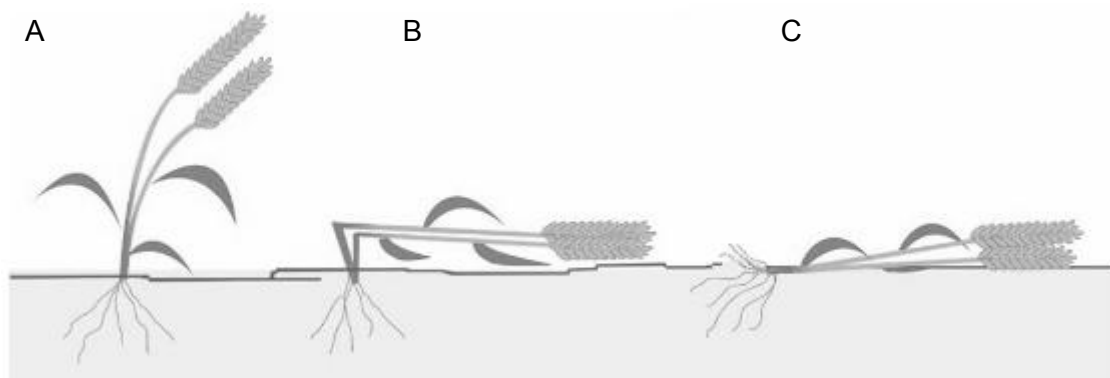


Figura 1. Diferentes tipos de vuelco; (a) esquema de una planta de trigo en su posición vertical normal, (b) planta volcada debido al quiebre o deformación del tallo; (c) vuelco por descalce (adaptado de Berry *et al.*, 2002).

### 1.2. Efectos del vuelco sobre el rendimiento en grano del cultivo de trigo

El porcentaje de cultivo volcado, así como el nivel de inclinación de las plantas, determinan el grado de reducción del rendimiento en grano, ya que el vuelco disminuye la asimilación de hidratos de carbono al reducir la eficiencia de uso de la radiación por autosombreo o por impedir el transporte de agua, minerales e hidratos de carbono (Pinthus, 1973; Stapper y Fischer, 1990; Tripathi *et al.*, 2003; Abbate, 2007; Berry y Spink, 2012). El momento de ocurrencia y la duración del mismo también determinan las pérdidas de rendimiento (Fischer y Stapper, 1987; Berry y Spink, 2012). Cuando el vuelco ocurre antes de que los tallos terminen de elongarse (previo a la floración) los entrenudos superiores pueden retomar el crecimiento vertical, sin que el rendimiento se afecte marcadamente (Abbate, 2007). El vuelco en floración y en la primera parte del llenado de granos suele ser el que más daño produce, al afectar el número de granos/m<sup>2</sup> y el peso por grano (peso de mil granos), además de dificultar la cosecha (Abbate, 2007). Si el vuelco se produce finalizado el llenado de los granos, no afecta el rendimiento directamente, pero dificulta la cosecha y puede reducir la calidad del grano y aumentar las pérdidas durante la recolección (Abbate, 2007).

### 1.3. Condiciones climáticas asociadas al vuelco en el cultivo de trigo

El hecho de que la ocurrencia de vuelco esté asociada con tormentas de viento y lluvia dificulta el estudio de este fenómeno. Sterling *et al.* (2003) estudiaron el vuelco utilizando túneles de viento transportables y encontraron que el vuelco por quiebre

(falla) del tallo ocurrió instantáneamente, en tanto que el vuelco por descalce de las plantas se produjo luego de varios minutos de acción del viento. La ocurrencia de lluvia es otro factor importante para que se produzca vuelco, debido a que el incremento de peso de las espigas y de las plantas puede generar vuelco aún con vientos leves (Pinthus, 1973; Baker, 1995).

#### **1.4. Características de la planta de trigo asociadas al vuelco**

La altura de la planta está asociada a la fuerza de palanca inducida por la acción de una fuerza sobre el cultivo, por lo que esta variable condiciona directamente su estabilidad (Pinthus, 1973). El mejoramiento genético redujo el riesgo de vuelco a través de la introgresión de los genes de enanismo *Rht-B1b* (*Rht1*) y *Rht-D1b* (*Rht2*) (Rajaram, 1995; Worland y Snape, 2001; Berry *et al.*, 2004). Sin embargo, aún se observa variación en susceptibilidad al vuelco entre líneas y cultivares modernos portadores de dichos genes, así como también se han detectado cultivares con altura mayor al promedio y buen comportamiento con condiciones favorables al vuelco (Abbate, P.E. com. pers., 2014; Bernardo, M., com. pers., 2014).

La asociación entre la altura de la planta y la susceptibilidad al vuelco varía según el material genético estudiado y las condiciones ambientales y de cultivo, por lo que diferentes autores han reportado resultados contrastantes con respecto a la misma. Por ejemplo, ni Zuber *et al.* (1999) ni Tripathi *et al.* (2003) encontraron una clara asociación entre la altura y el vuelco para grupos de cultivares de Suiza y de India y México (CIMMYT), respectivamente. Por otra parte, Kelbert *et al.* (2004a; 2004b) encontraron una asociación positiva y significativa entre la susceptibilidad al vuelco y la altura en dos grupos de cultivares de diversos orígenes, con un rango de variación en altura de 73 a 110 cm. Navabi *et al.* (2006) reportaron resultados similares en una población de 140 cultivares de México (CIMMYT) y Canadá, con una altura promedio de 80 cm y un rango de 66 a 106 cm. Esto fue consistente con lo encontrado por Berry y Berry (2015) en dos poblaciones de haploides duplicados segregantes para la tolerancia al vuelco y/o caracteres asociados, que presentaron altura promedio de 85 cm y un rango de variación de 65 a 105 cm aproximadamente, y coeficientes de correlación significativos (0,78 y 0,52) entre altura y vuelco observado a campo.

En la bibliografía se han reportado diferentes asociaciones entre el vuelco y ciertas características anatómicas y/o morfológicas de la planta. Por ejemplo, los cultivares de menor susceptibilidad al vuelco mostraron mayores valores de diámetro y espesor de la pared en la base de los tallos que aquellos susceptibles; esto fue observado en genotipos brasileños (Cruz *et al.*, 2001) y en cultivares de India y México (CIMMYT)

bajo diferentes manejos agronómicos (Tripathi *et al.*, 2003). Sin embargo, en un grupo de líneas del programa de mejoramiento y genotipos de diferentes orígenes, Kelbert *et al.* (2004b) no encontraron asociaciones claras entre estos caracteres y el agrupamiento por susceptibilidad al vuelco. En un grupo de 60 variedades élite de CIMMYT se encontró una asociación significativa y positiva entre el peso por unidad de longitud de tallo en post-antesis y la resistencia del tallo, carácter propuesto para la estimación del riesgo de vuelco (Berry *et al.*, 2012).

Otras características de la planta como la morfología de la espiga (largo y área) y el rendimiento en grano/espiga han sido propuestas como variables asociadas a la tolerancia al vuelco de diferentes cultivares (Pinthus, 1973; Baker *et al.*, 1998; Tripathi *et al.*, 2003).

### 1.5. Aspectos mecánicos del vuelco en trigo

El trigo posee tallos verticales, con caña de sección aproximadamente circular, que constan de cinco a seis entrenudos generalmente huecos y nudos sólidos (Pinthus, 1973). El entrenudo basal es muy corto, el segundo entrenudo posee mayor longitud, y ésta aumenta en los sucesivos entrenudos. El anclaje de las plantas de trigo al suelo depende de un sistema radical fibroso y de la abundancia de raíces adventicias de la corona de la planta. Este sistema de sostén brinda a las plantas la capacidad de soportar su propio peso, siempre que no actúen fuerzas externas extremas. En condiciones de campo, la lluvia aumenta el peso de los vástagos y el viento ejerce fuerzas cuya componente perpendicular a los tallos induce un momento de giro que puede causar el descalce o quiebre de los tallos (Pinthus, 1973; Baker, *et al.*, 1995). Cada tallo del cultivo puede considerarse como una viga empotrada en la tierra (Farquhar y Meyer Phillips, 2001; Figura 2) en la que la fuerza debida al viento actúa principalmente en la parte superior. En la sección basal del tallo, el momento (*i.e.* el producto de la fuerza por la distancia) alcanza su valor máximo (Pinthus, 1973). La sección del nudo es más resistente, por lo que el quiebre ocurre en los entrenudos y mayor es el riesgo de que se quiebren cuanto mayor es su longitud (Pinthus, 1973).

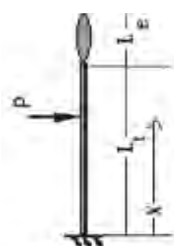


Figura 2. Esquema de un tallo de trigo analizado como una viga empotrada en el suelo.  $L_e$ =longitud de espiga;  $L_t$ = longitud de tallo;  $X$ = altura del centro de gravedad;  $P$ =fuerza externa aplicada sobre el vástago.

La tensión de rotura, *i.e.* la fuerza por unidad de superficie de un elemento estructural bajo flexión, está determinada por la naturaleza del material y el segundo momento de inercia, que es una propiedad geométrica de la sección transversal del elemento estructural (Niklas, 1992). La tensión de rotura del tallo ( $\sigma$ ) considerado como elemento estructural regular, se puede calcular con el momento máximo que tolera la base del tallo ( $B_s$ ), el radio externo del entrenudo ( $a$ ) y el espesor de la pared ( $t$ ), a partir de la fórmula de análisis estructural de un cilindro (Baker *et al.*, 1998):

$$\text{Ec. [1]} \quad \sigma = \frac{M}{J}$$

donde  $J_x$  es el segundo momento de inercia respecto de un plano perpendicular al tallo, que se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. [2]} \quad J = \frac{\pi (a^4 - (a-t)^4)}{64}$$

Físicamente el segundo momento de inercia es función de las tensiones y deformaciones máximas que aparecen por flexión en un elemento estructural y, por tanto, junto con las propiedades del material determina la resistencia máxima de un elemento estructural bajo flexión.

### 1.5.1. Modelos predictivos de vuelco en trigo

Crook *et al.* (1994) y Farquhar y Meyer Phillips (2001) determinaron coeficientes de seguridad contra el vuelco. Un coeficiente de seguridad es una aproximación utilizada en ingeniería para cuantificar el margen de seguridad contra una falla estructural, y puede ser definido como la relación entre el momento máximo que puede tolerar una pieza y el momento de trabajo (Farquhar y Meyer Phillips, 2001). Crook *et al.* (1994) propusieron el cálculo del coeficiente de seguridad para fallas de anclaje y de la base del tallo, en tanto que Farquhar y Meyer Phillips (2001) plantearon coeficientes relativos a un cultivar testigo con un manejo agronómico específico. La primera variante resultaría más conveniente para la caracterización de diferentes cultivares de trigo, y se puede calcular como:

$$\text{Ec. [3]} \quad S = \frac{M_{max}}{M_{PP}}$$

donde  $M_{PP}$  es el momento debido al peso propio del vástago transmitido a su base, que a su vez se puede calcular según:

$$\text{Ec. [4]} \quad M_{PP} = \frac{wL^2}{2}$$

donde  $\theta$  es el ángulo del vástago respecto a la vertical,  $X$  es la altura del centro de gravedad del tallo con espiga,  $m$  es la masa del vástago (incluyendo hojas, tallo, espiga y granos) y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Por otra parte, Baker *et al.* (1998) propusieron el análisis de la probabilidad de ocurrencia de vuelco, basándose en que el tallo y la planta funcionan como un objeto oscilante, y en la probabilidad de ocurrencia de ráfagas máximas de viento. Este modelo estima que el vuelco va a ocurrir cuando el momento flector de un vástago (fuerza de palanca del vástago) supere el momento máximo que puede tolerar la base del tallo (resistencia del tallo). El momento flector ( $B_m$ ) al que un tallo va a ser sometido ante un determinado valor de velocidad de viento se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. [5]} \quad \frac{1}{2} \rho C_d V_g^2 A X \left( \frac{\pi}{\pi} \right) \left( -\pi \frac{(\pi/)}{\pi/} \right)$$

donde  $\delta$  es la densidad del aire ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  $C_d$  es el coeficiente de arrastre de la espiga,  $V_g$  es la velocidad de ráfaga de viento máxima (m/s),  $g$  es la aceleración debida a la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $\xi$  es el coeficiente de amortiguamiento del tallo,  $X$  es la altura del centro de gravedad del tallo con espiga (m),  $A$  es el área de la espiga ( $\text{m}^2$ ) y  $n_n$  es la frecuencia natural del tallo (*i.e.* número de ciclos de oscilación del tallo por segundo; Hz).

Berry *et al.* (2003a) propusieron estimar el riesgo de vuelco en términos de la velocidad de viento que provocaría el momento máximo que la base del tallo puede tolerar ( $B_s$ ). A partir de la Ec. [5], si se conoce el valor de  $B_s$ , igualando  $B_m$  a  $B_s$ , se puede despejar la velocidad de ráfaga que provocaría la falla del tallo ( $V_{gs}$ ),

$$\text{Ec. [6]} \quad \sqrt{\frac{2 B_s}{\rho C_d A X \left( \frac{\pi}{\pi} \right) \left( -\pi \frac{\text{sen}(\pi/)}{\pi/} \right)}}$$

Por otra parte, Sterling *et al.* (2003) evaluaron los parámetros aerodinámicos de este modelo durante el desarrollo del cultivo de trigo, bajo diferentes manejos agronómicos y condiciones ambientales, y encontraron que el coeficiente de amortiguamiento del tallo y el coeficiente de arrastre de la espiga se pueden considerar como constantes (0,8 y 1,0, respectivamente). Berry *et al.* (2004) presentaron ecuaciones que permiten estimar la altura del centro de gravedad de un tallo con espiga, la frecuencia natural del tallo y el área de la espiga (Ec. [7], Ec. [8] y Ec. [9], respectivamente). Además, Berry *et al.* (2013) determinaron que la altura del



centro de gravedad del tallo con espiga es proporcional a la altura de planta hasta la espiga sin aristas.

$$Ec. [7] \quad \frac{PE}{X} = \frac{PT}{LT}$$

$$Ec. [8] \quad \frac{PE}{X} = \frac{PT}{LT} + \frac{A}{LE}$$

$$Ec. [9] \quad \frac{PE}{X} = \frac{PT}{LT} + \frac{A}{LE} + \frac{A}{LE}$$

donde  $X$  es la altura del centro de gravedad del tallo con espiga (m),  $PE$  es el peso de espiga (g),  $PT$  es el peso del tallo sin espiga (g),  $LE$  es la longitud de la espiga (m),  $LT$  es la longitud del tallo sin espiga (m),  $A$  es el área de la espiga (m<sup>2</sup>) y  $n_n$  es la frecuencia natural del tallo medido como número de oscilaciones del vástago por segundo (Hz).

### 1.6. Estrategias para evitar el vuelco en trigo

Ciertas prácticas de manejo agronómico o condiciones de cultivo permiten reducir el riesgo de vuelco por cambios en la estructura del cultivo. Se ha encontrado que en siembras tempranas se presenta mayor riesgo de vuelco (Stapper y Fischer, 1990; Berry *et al.*, 2000). Stapper y Fischer (1990) encontraron que cultivos en esta situación presentan una mayor longitud de sus entrenudos, una mayor altura de la planta y, como resultado, un incremento en el riesgo de vuelco. Por otra parte, Berry *et al.* (2000) encontraron que en siembras más tempranas los tallos son frágiles debido a una reducción en su diámetro y en el espesor de la pared de los entrenudos basales. Una reducción en el número de plantas por unidad de superficie en densidades de siembra superiores a la óptima también reduce el riesgo de vuelco (Stapper y Fischer, 1990; Easson *et al.*, 1993, Berry *et al.*, 2000). En este sentido, un mayor número de macollos/m<sup>2</sup> también ha sido sugerido como variable asociada positivamente al vuelco (Tripathi *et al.*, 2003).

Se ha observado que una alta disponibilidad de nitrógeno (principalmente  $N$ ), ya sea proveniente de mineralización de materia orgánica del suelo o de fertilizantes químicos, aumenta el riesgo de vuelco (Berry *et al.*, 2000; Crook y Ennos, 1995). Esto se ha asociado con una mayor altura de las plantas, pero sobre todo con una reducción en el peso por unidad de longitud de los entrenudos basales, y por lo tanto con una menor resistencia de la base del tallo (Crook y Ennos, 1995; Berry *et al.*, 2000). El uso de reguladores de crecimiento que reducen la altura de las plantas es común en el norte y oeste de Europa, en Canadá, en EEUU y en Brasil. Por ejemplo,

en el Reino Unido el 84% del trigo invernal es tratado con reguladores de crecimiento (Berry, 2004). En Argentina, el uso de reguladores de crecimiento estaría limitado por el alto costo que presentan estos productos (Abbate *et al.*, 1998b; Abbate, 2007).

El mejoramiento genético de los cultivares de trigo redujo marcadamente el riesgo de vuelco con la introgresión de los genes de enanismo *Rht*. La reducción en altura de planta se combinó con un aumento en el índice de cosecha, que a su vez aumentó el rendimiento. Crook y Ennos (1994) y Berry *et al.* (2004) han planteado que el mejoramiento no ha alterado significativamente la resistencia de los tallos y el sistema de anclaje de la planta durante las últimas décadas, con lo que si se considera en conjunto el incremento del rendimiento potencial y el estancamiento de la altura luego de la Revolución Verde, es posible esperar un aumento en el riesgo de vuelco de los nuevos cultivares (Berry *et al.*, 2007; Reynolds *et al.*, 2012; Berry *et al.*, 2014).

### **1.7. Estudio del fenómeno de vuelco en trigo a nivel local**

En la Unidad Integrada Balcarce se han conducido ensayos de evaluación de cultivares bajo riego y alta disponibilidad de nutrientes desde 1995. Desde 2007, estos ensayos forman parte de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Trigo Pan en Alta Tecnología (RET-AT) coordinada por el Instituto Nacional de Semillas (INASE). En estos ensayos, que incluyen la mayoría de los cultivares de alto rendimiento presentes en el mercado, se determina el rendimiento de grano, variables fenológicas y un índice de vuelco (Abbate *et al.*, 2009). El índice de vuelco se determina a partir del ángulo de inclinación de los tallos respecto de la vertical (A) y la superficie afectada (S) de cada parcela (Stapper y Fischer, 1990; Abbate, 2007), según:

Ec. [10]

Por lo tanto, 0% indica ausencia de vuelco, y 100% que todos los tallos están en posición horizontal en toda la parcela. En base a este índice, determinado en varios ciclos agrícolas, ha sido posible clasificar a algunos de los cultivares evaluados en susceptibles o tolerantes al vuelco (Abbate *et al.*, 2009; Abbate *et al.*, 2010, Mirabella, 2012 y otros datos no publicados).

Abbate *et al.* (2007) observaron que el vuelco en el sudeste bonaerense se produce como resultado de una falla de la estructura de la base del tallo, más que por problemas de anclaje. Este fenómeno se manifiesta ante condiciones climáticas adversas (tormentas con vientos fuertes) por el aumento de la carga sobre el cultivo producido por el viento y la lluvia.

La mayor parte de los estudios disponibles sobre el vuelco se han realizado con cultivares extranjeros y en ambientes distintos a los del sudeste bonaerense, y las asociaciones encontradas no son siempre consistentes. A nivel local, no existe información acerca de las características de los cultivares difundidos ni de los mecanismos que determinan el riesgo de vuelco de los mismos, por lo que resulta de interés disponer de información local al respecto.

## **1.8. Hipótesis y objetivos**

### **1.8.1. Hipótesis**

1) Las diferencias en susceptibilidad al vuelco de cultivares de trigo pan, actualmente difundidos en Argentina, están asociadas con uno o más de los siguientes caracteres:

- |  |   |
|--|---|
| a) la altura de la planta;                         | l) la longitud del entrenudo basal (EB);      |
| b) el rendimiento en grano;                        | m) el diámetro del EB;                        |
| c) numero de espigas/superficie                    | n) el espesor de la pared del tallo en el EB; |
| d) el peso seco/espiga;                            | o) el perímetro del EB;                       |
| e) el rendimiento/espiga;                          | p) el área externa del EB;                    |
| f) el índice de cosecha;                           | q) el área del lumen del EB;                  |
| g) el peso seco total del cultivo;                 | r) el área de pared del EB;                   |
| h) el peso seco/vástago;                           | s) la fuerza de quiebre del EB;               |
| i) el peso seco/tallo;                             | t) el segundo momento de inercia del tallo.   |
| j) el peso seco del tallo/altura de la planta;     |   |
| k) el peso seco de los 10 cm de la base del tallo; |   |

2) Al menos algunos de los caracteres mencionados en la Hipótesis 1 están asociados entre sí.

3) La susceptibilidad al vuelco se puede estimar con un modelo que incluye al menos uno de los caracteres mencionados en la Hipótesis 1.

4) El/los carácter/caracteres incluido/s en el modelo para estimar la susceptibilidad al vuelco es/son afectado/s por variaciones en las condiciones de manejo.

### **1.8.2. Objetivo general**

Estimar la susceptibilidad al vuelco en trigo pan por medio de variables de fácil medición que permitan comparar materiales genéticos bajo diferentes condiciones ambientales en el sudeste de la provincia de Buenos Aires.

#### **1.8.1. Objetivos particulares**

- 1) Caracterizar los cultivares por su grado de susceptibilidad al vuelco con un manejo favorable a la ocurrencia de este fenómeno.
- 2) Determinar variables que según la bibliografía están asociadas con el vuelco, en cultivares de trigo pan presentes en la RET-AT (alta tecnología).
- 3) Ajustar un modelo que asocie dichas variables con el grado de tolerancia al vuelco de los cultivares.
- 4) Evaluar las variables asociadas al vuelco según el modelo ajustado, en diferentes condiciones de manejo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Caracterización climática de los ciclos agrícolas

Los datos de temperatura, radiación, precipitaciones y velocidad de viento se extrajeron de los registros diarios del Servicio Agrometeorológico de la EEA INTA Balcarce. La radiación fotosintéticamente activa se calculó como:  $0,5 * \text{radiación global}$ . La evapotranspiración potencial de trigo fue calculada como el producto entre la evapotranspiración Penman-Monteith y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) de trigo (Allen *et al.*, 1998). El dato de velocidad de viento es el promedio diario registrado a 2 m de altura.

### 2.2. Caracterización de los cultivares por su susceptibilidad al vuelco (experimentos BAT10, BAT11 y BVU13)

Un grupo de cultivares de ciclo intermedio-largo portadores de genes de enanismo fue caracterizado por su susceptibilidad al vuelco en dos experimentos de la RET-AT (BAT10 y BAT11) y un experimento con condiciones favorables a la ocurrencia de vuelco (BVU13), todos ellos conducidos en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce ( $37^{\circ} 5'$  latitud Sur,  $58^{\circ} 18'$  longitud Oeste, 130 m snm). Los experimentos BAT10 y BAT11 fueron conducidos de acuerdo al protocolo de los ensayos de la RET-AT (Abbate *et al.*, 2009) durante los ciclos agrícolas 2010/11 y 2011/12, respectivamente. Los experimentos fueron conducidos bajo labranza convencional, sin limitaciones hídricas o nutricionales y con control de plagas y enfermedades fúngicas. La densidad de siembra fue de 230 plantas/m<sup>2</sup>. En ambos experimentos se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones; cada unidad experimental estuvo constituida por una parcela de 5,5 m de largo y siete surcos distanciados a 0,2 m entre sí. El experimento BVU13 se condujo durante el ciclo agrícola 2013/14 según el mismo protocolo, duplicando la lámina de riego aplicada entre fin de macollaje y madurez.

La comparación de los cultivares por su susceptibilidad al vuelco se realizó a partir del IV registrado en madurez, calculado según la Ec. [10]. El IV se expresó como desvío del IV promedio ( $\bar{IV}$ ) de los cultivares a comparar, para eliminar el efecto del año en que fue medido. Así, para el cultivar  $i$ :

$$\text{Ec. [11]} \quad \Delta IV_i = IV_i - \bar{IV}$$

Aquellos cultivares con vuelco por debajo de la media presentaron valores negativos de  $\Delta IV$ . Para caracterizar a cada cultivar se calculó el  $\Delta IV$  promediado a

través de los tres experimentos disponibles. Los cultivares evaluados, con su origen y año de introducción, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Cultivares evaluados, origen, año de inscripción y experimentos en los que fueron incluidos.

	Cultivar	Origen <sup>a</sup>	Año de inscripción	Experimento		
				BAT10	BAT11	BVU13
1	ACA 201 <sup>b</sup>	ARG	2007	X	X	X
2	ACA 315 <sup>b</sup>	ARG	2006	X	X	X
3	ACA 320 <sup>b</sup>	ARG	2009	X	X	X
4	SY 200 <sup>b</sup>	FRA	2010	X	X	X
5	Baguette 10 <sup>b</sup>	FRA	1999	X	X	X
6	Baguette 30 <sup>b</sup>	FRA	2009	X	X	X
7	Baguette 31 <sup>b</sup>	FRA	2009	X	X	X
8	Baguette Premium 11 <sup>b</sup>	FRA	2004	X	X	X
9	Baguette 17 <sup>c</sup>	FRA	2008	X		
10	Baguette 18 <sup>c</sup>	FRA	2008	X		
11	Baguette 19 <sup>c</sup>	FRA	2005		X	
12	BIOINTA 2004 <sup>c</sup>	ARG	2008	X		
13	BIOINTA 3004 <sup>c</sup>	ARG	2006	X		
14	BIOINTA 3005 <sup>b</sup>	EEUU	2009	X	X	X
15	Buck Poncho <sup>b</sup>	ARG	1986	X	X	X
16	Buck Taita <sup>c</sup>	ARG	2008	X		
17	Klein Carpincho <sup>c</sup>	ARG	2007	X		
18	Klein Gladiador <sup>b</sup>	ARG	2010	X	X	X
19	Klein Guerrero <sup>b</sup>	ARG	2007	X	X	X
20	SRM 2330 (LE 2330) <sup>b</sup>	URU	2009	X	X	X
21	SRM Noga <sup>b</sup>	FRA	2006	X	X	X
22	SY 100 <sup>c</sup>	FRA	2011		X	
23	SY 110 <sup>c</sup>	FRA	2011		X	
24	SY 300 <sup>c</sup>	FRA	2010		X	

<sup>a</sup> ARG= Argentina, EEUU: Estados Unidos, FRA= Francia, URU= Uruguay.

<sup>b</sup> Cultivar utilizado para generar un modelo explicativo del vuelco (ver punto 2.4)

<sup>c</sup> Cultivar utilizado para validar el modelo generado (ver punto 2.4)

### 2.3. Evaluación de variables a nivel de parcela y en vástagos individuales (experimentos BAT10 y BAT11)

Las variables tentativamente asociadas al vuelco se determinaron en muestras de vástagos de los experimentos BAT10 y BAT11. La descripción de las variables analizadas se presenta en la Tabla 2.

La altura de las plantas (*ALTURA*) se calculó como el promedio de dos mediciones por parcela. Además, de cada parcela se tomó una muestra formada por cuatro submuestras de diez vástagos cortados al ras del suelo. El rendimiento por unidad de superficie en base seca (peso seco de grano, *PSG*), se determinó a partir de la cosecha mecánica de aproximadamente 5 m<sup>2</sup>. Antes de la cosecha se midió el largo cosechable de cada parcela y con posterioridad a la misma se evaluaron las pérdidas de cosecha para corregir el valor de rendimiento en caso de ser relevantes.

Las muestras tomadas en los experimentos BAT10 y BAT11 fueron fraccionadas separando espigas y tallos. Las espigas se cortaron en la base del pedúnculo. Todas

las fracciones fueron pesadas luego de secarlas en estufa a 60°C hasta peso constante. A partir de estos datos se calculó el peso del vástago (tallo con espiga; *PSV*), el peso seco por espiga con granos (*PS/ESP*) y el rendimiento/espiga (*PSG/ESP*). Además se cortaron y pesaron los 10 cm basales de cada tallo (*PS10B*). Se determinó el número de espigas por unidad de superficie, el índice de cosecha (*IC*) y el peso seco total del cultivo (*PST*) de cada parcela.

**Tabla 2. Descripción de las variables evaluadas y unidades de medición utilizadas.**

Variable	Unidad de medición	Descripción
1	%	Índice de vuelco expresado como desvío de la media
2 ALTURA	cm	Altura de las plantas medida en la parcela
3 PSG	g/m <sup>2</sup>	Rendimiento en grano por unidad de superficie
4 NUM.ESP	numero/m <sup>2</sup>	Número de espigas por unidad de superficie
5 PS/ESP	g/espiga	Peso seco promedio de una espiga
6 PSG/ESP	g/espiga	Peso seco de grano/espiga
7 IC	g grano/g cultivo	Índice de cosecha
8 PSTOT	g/m <sup>2</sup>	Peso seco total del cultivo por unidad de superficie
9 PSV	g/espiga	Peso seco total del cultivo/espiga
10 PSTALLO	g/tallo	Peso seco promedio de un tallo
11 PSTALLO/ALT	g/cm	Peso seco tallo/Altura de la planta
12 PS10B	g/cm	Peso de los 10 cm basales de tallo
13 LENB	cm	Longitud del entrenudo basal
14 D.EXT.MAX.C	mm	Diámetro externo máximo del entrenudo basal medido con calibre
15 RQ	N	Fuerza de quiebre del tallo
<i>Mediciones en fotografías de la base del tallo</i>		
16 EPEB	mm	Espesor de la pared de la base del tallo
17 D.FERET.INT.MÍN	mm	Diámetro de FERET <sup>a</sup> externo mínimo
18 D.FERET.INT.MAX	mm	Diámetro de FERET <sup>a</sup> externo máximo
19 D.FERET.EXT.MÍN	mm	Diámetro de FERET <sup>a</sup> externo mínimo
20 D.FERET.EXT.MAX	mm	Diámetro de FERET <sup>a</sup> externo máximo
21 PERÍMETRO.EXT	mm	Perímetro externo
22 ÁREA.EXT	mm <sup>2</sup>	Área externa de la sección del tallo
23 ÁREA.INT	mm <sup>2</sup>	Área interna de la sección del tallo
24 ÁREA.PARED	mm <sup>2</sup>	Diferencia entre el área externa e interna de la sección del tallo
<i>Variables calculadas</i>		
25 MPP	N mm	Momento de la fuerza debido al peso propio
26 B <sub>s</sub>	N mm	Momento máximo del entrenudo basal
27 J <sub>x</sub>	mm <sup>4</sup>	Momento de inercia del área del tallo
28 σ	MPa	Tensión de rotura del material del tallo
29 CS	1:1	Coefficiente de seguridad del tallo
30 V <sub>gs</sub>	m/s	Ráfaga de viento que produce vuelco

<sup>a</sup> FERET (Face Recognition Technology; también conocido como "calibre", i.e. la máxima distancia entre 2 paralelas que pasan por el borde de la imagen del cuerpo).

En cada tallo se midió la longitud del entrenudo basal (LENB) con regla milimétrica, y el diámetro externo máximo del tallo 1 cm debajo del primer nudo (D.EXT.MAX.C.) con calibre digital. Se tomaron fotografías de la base del tallo con una lupa digital, colocando el tallo sobre un portaobjetos graduado que permitió escalar la imagen y transformar las unidades de píxeles a milímetros. Las fotos fueron analizadas por medio del programa informático Matrox Inspector 2.2 (MATROX Electronic Systems). Se determinó digitalmente el espesor promedio de la pared del tallo (EPEB). El segundo momento de inercia de área (J<sub>x</sub>) se calculó mediante la Ec. [2], con los valores D.EXT.MAX.C. y EPEB. El programa Matrox Inspector 2.2 permitió realizar un análisis de figuras geométricas conformadas por regiones de píxeles conectados (análisis de partícula), brindando automáticamente sus parámetros geométricos

(Figura 3). Así, se obtuvo el perímetro del tallo, el área externa e interna y los diámetros de "Ferret" internos y externos (máximos y mínimos). Las variables *AREA EXT* y *PERÍMETRO* hacen referencia al elipsoide de la sección del tallo, en tanto que las medidas internas corresponden al lumen del tallo (*AREA INT*). Finalmente se calculó la diferencia entre área externa e interna de la sección del tallo (*AREA PARED*).



Figura 3. Parámetros geométricos de la sección transversal del tallo, determinados en las fotografías. (izq) *ÁREA.INT*, *D.FERET.INT.MÍN* y *D.FERET.INT.MAX*. (centro) *PERÍMETRO*, *ÁREA.EXT* y *D.FERET.EXT.MÍN* y *D.FERET.EXT.MAX*.(derecha) *EPEB*.

Según su condición de apoyo, el comportamiento estructural de un tallo de trigo se puede analizar como una viga empotrada en el suelo (Figura 2). A partir de esta consideración, se midió *RQ* (i.e. la fuerza de quiebre del entrenudo basal), individualmente en 15 tallos, a 10 cm de la base del tallo, con un dinamómetro (Figura 4). El valor de  $B_s$  (momento máximo que resiste la sección de la base del tallo) se obtuvo como el producto de *RQ* medida con el dinamómetro y la distancia, desde la base del tallo, a la que se aplicó la misma (10 cm).



Figura 4. Dinamómetro utilizado para registrar la fuerza de quiebre.

### 2.3.1.1. Métodos estadísticos

Los datos de los experimentos BAT10 y BAT11 se analizaron mediante un análisis de varianza (ANVA) combinado a través de años con efectos fijos de genotipo (cultivares), ambiente (años) y su interacción (Annicchiarico *et al.*, 2002). La asociación entre las variables se evaluó mediante análisis de correlación. Todas las



variables que presentaron diferencias significativas entre cultivares según ANVA ( $p < 0,05$ ) se incluyeron en un análisis de regresión lineal múltiple para estudiar su asociación con el . Cuando la interacción genotipo x ambiente fue baja o nula se calculó el promedio de cada cultivar como el promedio de los desvíos de la media de cada experimento para eliminar el efecto del año. Se utilizó el software estadístico R (R Core Team, 2014) y los paquetes R Commander (Fox, 2005) y Agricolae (Mendiburu, 2008).

#### 2.4. Evaluación y validación de modelos explicativos del vuelco

Los modelos teóricos propuestos por Crook *et al.*, (1994) y Berry *et al.*, (2003a) se utilizaron para caracterizar los cultivares estudiados y se evaluó su asociación con el de los mismos. Estos modelos incluyen la altura del centro de gravedad del vástago. La altura del centro de gravedad del tallo con espiga en madurez se calculó para un subconjunto de los cultivares del experimento BAT10 según la Ec. [7] y se encontró que su valor se puede estimar como  $0,72 \cdot ALTURA$  ( $R^2 = 0,99$ ;  $gl=15$ ;  $P < 0,001$ ).

El coeficiente de seguridad del tallo ( $CS$ ; Crook *et al.*, 1994) se calculó según la Ec. [3], con el valor de  $B_s$  calculado a partir de  $RQ$  y el momento debido al peso propio ( $M_{PP}$ ) calculado según la Ec. [4].

La velocidad de ráfaga que provocaría el quiebre del tallo ( $V_{gs}$ ; Berry *et al.*, 2003a) se calculó mediante la Ec. [6]. En esta ecuación se utilizaron el  $B_s$  calculado a partir de la fuerza de quiebre del tallo ( $RQ$ ), el coeficiente de amortiguamiento del tallo ( $\xi$ ) y el coeficiente de arrastre de la espiga ( $C_d$ ) propuestos por Sterling *et al.* (2003), y la frecuencia natural del tallo ( $n_n$ ) y el área de la espiga se estimaron según las Ec. [8] y Ec. [9], respectivamente.

Por otra parte, a través de un análisis de regresión lineal múltiple, se generó un modelo que permitió explicar la susceptibilidad al vuelco de los cultivares evaluados utilizando aquellas variables (Tabla 2) que presentaron diferencias significativas entre cultivares. El ajuste del modelo obtenido se comparó con el ajuste de los modelos propuestos por la bibliografía, y fue además validado con un conjunto de datos de diez cultivares distintos a los utilizados para generarlo. Los cultivares incluidos en el análisis se listan en la Tabla 1. El de cada cultivar se estimó con el modelo y se compararon los valores de observados vs. estimados mediante un análisis de correlación y regresión lineal.

Finalmente, dado que en el contexto de un programa de mejoramiento sería más relevante la evaluación del comportamiento relativo de las líneas avanzadas con

respecto a testigos de comportamiento conocido que la estimación de valores absolutos de índice de vuelco, se realizó el análisis de ordenamiento categórico de McNemar (Sun y Yang, 2008). Los valores de estimados y observados de diez cultivares fueron agrupados en tres categorías definidas por intervalos de de igual amplitud.

## **2.5. Evaluación de diferentes condiciones de cultivo (experimento BM13)**

Las variables ALTURA, PS/ESP, D.EXT.MAX.C, EPEB y RQ fueron determinadas en vástagos en el experimento BM13, conducido en el campo experimental de la EEA Balcarce, INTA, bajo labranza convencional. En este experimento se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo factorial (dos cultivares y cinco condiciones de manejo de cultivo) y tres repeticiones. La unidad experimental consistió en una parcela de siete surcos de 5,5 m de largo, distanciados 0,2 m entre sí. En dicho experimento se incluyeron los cultivares comerciales SY 110 y Baguette 10 bajo las siguientes condiciones de cultivo:

- (1) testigo conducido según el protocolo de la RET-AT (Abbate *et al.*, 2009), con una densidad de siembra de 232 semillas viables/m<sup>2</sup>
- (2) reducción de la densidad de siembra en 50% (116 semillas viables/m<sup>2</sup>).
- (3) siembra en camas: reducción de la densidad de siembra con cambio de la distribución espacial, de los siete surcos de la parcela luego de la emergencia se eliminaron mecánicamente las plantas de los surcos 1, 4, y 7, quedando un surco sin sembrar cada dos surcos sembrados a 0,2 m.
- (4) reducción de la radiación incidente en 50% durante el macollaje por medio de cobertura con redes de sombreo,
- (5) reducción de biomasa vegetativa previo a la encañazón, por medio de corte mecánico de toda la parcela a 5 cm de altura.

### **2.5.1.1. Métodos estadísticos**

Se realizó un ANVA con efectos fijos de genotipo (cultivares), ambiente (manejo) y su interacción (Annicchiarico *et al.*, 2002) para cada una de las variables y el . Cuando se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ), las medias se compararon por medio de la mínima diferencia significativa (MDS). Se utilizó el software estadístico R (R Core Team, 2014) y los paquetes R Commander (Fox, 2005) y Agricolae (Mendiburu, 2008).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Clima

La Tabla 3 muestra los valores históricos de las principales variables climáticas y los valores registrados durante los ciclos agrícolas 2010/11, 2011/12 y 2013/14, en los que se desarrollaron los experimentos de campo BAT10, BAT11, y BVU13 y BM13, respectivamente.

*Tabla 3. Valores de temperatura media, radiación fotosintéticamente activa, precipitación + riego y evapotranspiración potencial de trigo en Balcarce durante los ciclos de cultivo 2010/11, 2011/12 y 2013/14, y sus respectivos promedios históricos (1970-2014).*

	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<i>Temperatura media (°C)</i>							
2010	9,4	7,8	8,7	10,8	13,6	16,3	20,8
2011	8,6	8,5	8,4	11,5	13,1	18,8	19,8
2013	9,3	8,0	8,8	9,9	14,5	17,2	21,5
Histórica	8,3	7,7	9,1	10,7	13,4	16,1	19,0
<i>Radiación fotosintéticamente activa (MJ /m<sup>2</sup> d)</i>							
2010	3,1	3,0	4,6	6,4	7,7	10,1	12,5
2011	2,6	3,4	4,0	6,6	7,7	10,2	11,3
2013	3,6	3,2	4,9	5,0	7,7	9,5	11,5
Histórica	3,0	3,2	4,4	6,3	8,1	10,1	11,1
<i>Precipitación + Riego (mm/mes)</i>							
2010	57	100	36	82	44,7	116+66	33
2011	90	73	25	36	41+60	151+60	36
2013	11	35	6	136	102+128	127+136	27
Histórico	49	51	52	61	93	90	102
<i>Evapotranspiración potencial de trigo (mm/mes)<sup>a</sup></i>							
2010	2,4	2,7	10,7	46,9	97,6	114,4	82,6
2011	2,3	2,4	10,2	45,8	98,5	109,0	88,8
2013	2,1	3,0	9,2	57,2	97,7	121,5	76,5
Histórica	3,0	2,6	13,4	40,9	99,6	113,8	83,7
<i>Velocidad de viento (km/h)</i>							
2010	6,4	8,3	6,8	7,8	8,6	6,9	7,6
2011	6,3	7,0	8,5	7,9	8,6	7,4	7,3
2013	7,4	7,0	8,7	8,3	6,7	8,3	8,1
Histórica	7,5	7,6	8,1	8,5	8,0	8,6	8,6

<sup>a</sup> calculada como el producto entre la evapotranspiración Penman-Monteith y el Kc de trigo (Allen et al., 1998).

Los años en los que se desarrollaron los experimentos fueron normales; no se registraron valores extremos de temperatura, radiación, precipitación o evapotranspiración ni adversidades meteorológicas que produjeran daños relevantes en los experimentos. Los valores de velocidad diaria de viento registrados durante los meses de mayor susceptibilidad al vuelco para el cultivo de trigo, noviembre y diciembre fueron menores al promedio histórico. En consecuencia, los cultivos de los experimentos analizados crecieron con condiciones ambientales favorables, lo que les permitió un normal crecimiento y desarrollo.

### 3.2. Comportamiento de los cultivares seleccionados

A partir de la observación de los datos registrados a lo largo de diferentes campañas agrícolas se pueden observar cultivares con diferente susceptibilidad al vuelco. En la Tabla 4 se presentan los valores de IV promedio y de cada cultivar para los experimentos BAT10, BAT11 y BVU13. En cada uno de estos experimentos se encontraron diferencias significativas entre cultivares ( $p < 0,001$ ;  $gl=13$ ). En promedio, los valores de IV registrados en el experimento BAT10 fueron menores que aquellos del experimento BAT11.

El experimento conducido bajo un manejo de alta tecnología, pero con condiciones más favorables al vuelco (BVU13), permitió una mayor expresión de las diferencias entre cultivares. Los valores de IV obtenidos en el experimento BVU13 (experimento con mayor ocurrencia de vuelco) presentaron una asociación lineal significativa ( $R^2 = 0,56$ ;  $p = 0,002$ ;  $gl = 12$ ) con el promedio de los experimentos de la RET-AT BAT10 y BAT11.

Tabla 4. Índice de vuelco porcentual, expresado como desvío del promedio de cada cultivar con respecto al promedio general de cada experimento.

	IV BAT10	IV BAT11	IV BVU13	IV promedio
ACA 201	-4,1	9,7	5,3	3,6
ACA 315	-4,1	20,6	13,3	9,9
ACA 320	-4,1	-7,2	-2,0	-4,4
SY 200	-4,1	0,6	-3,2	-2,3
Baguette 10	-4,1	-8,8	-15,8	-9,6
Baguette 30	-4,1	-8,8	-18,8	-10,6
Baguette 31	-4,1	-8,5	-5,4	-6,0
Baguette Premium 11	-4,1	-8,8	-18,4	-10,5
BIOINTA 3005	-4,1	0,8	7,5	1,4
Buck Poncho	-4,1	-7,4	6,6	-1,6
Klein Gladiador	10,9	-2,5	14,6	7,6
Klein Guerrero	26,9	8,6	9,0	14,8
SRM 2330	7,9	18,4	16,8	14,3
SRM Nogal	-4,1	-6,6	-9,3	-6,7
Promedio	4,1	8,8	18,8	10,6

### 3.3. Variables evaluadas a nivel de parcela y de vástagos individuales

Los valores promedio, mínimo, máximo y el coeficiente de variación de cada variable en los experimentos BAT10 y BAT11 se presentan en la Tabla 5. Además, la Tabla 5 muestra, para cada variable, la significación de los efectos del genotipo (cultivar), ambiente (año) y su interacción. La interacción genotipo x ambiente resultó no significativa para las variables: *ALTURA*, *NUM.ESP*, *IC*, *PSTOT*, *LENB*, *D.EXT.MAX.C*, *RQ*,  $J_x$  y  $\sigma$  ( $p > 0,1$ ; Tabla 5). En los casos de aquellas variables que presentaron efectos de interacción genotipo x ambiente significativos, no se presentaron interacciones cruzadas y el valor de la suma de cuadrados de la interacción fue siempre menor que el de la suma de cuadrados de genotipo o

ambiente. Excepto  $\sigma$ , todas las variables analizadas presentaron diferencias significativas entre cultivares ( $p < 0,01$ ). La mayor parte de las mismas mostró, además, diferencias entre años, a excepción de *PST* ( $p = 0,24$ ), *PSTALLO* ( $p = 0,14$ ), *PERÍMETRO* ( $p = 0,65$ ) y  $J_x$  ( $p = 0,34$ ) (Tabla 5).

Tabla 5. Nivel de significación de los efectos de genotipo, ambiente e interacción genotipo x ambiente (según ANVA); media, mínimo y máximo, y coeficiente de variación porcentual (CV%) para los experimentos BAT10 y BAT11, de cada uno de los caracteres medidos o calculados. La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2.

	Media		Mínimo		Máximo		CV%		p		G x A
	BAT10	BAT11	BAT10	BAT11	BAT10	BAT11	BAT10	BAT11	Genotipo (G)	Ambiente (A)	
ALTURA	93	91	83	81	103	100	2	3	0,00 *	0,00 *	0,88 ns
PSG	713	638	606	557	822	719	8	4	0,00 *	0,00 *	0,02 *
NUM.ESP	422	583	331	482	583	826	11	9	0,00 *	0,00 *	0,13 ns
PS/ESP	2,23	1,5	1,77	1,21	2,67	1,83	8	9	0,00 *	0,00 *	0,03 *
PSG/ESP	1,72	1,13	1,42	0,88	2,10	1,38	9	10	0,00 *	0,00 *	0,09 *
IC	44	39	40	35	49	48	6	6	0,00 *	0,00 *	0,25 ns
PSTOT	1630	1668	1351	1237	1893	2019	8	6	0,00 *	0,24 ns	0,13 ns
PSV	3,9	2,9	3,3	2,4	4,4	3,6	6	9	0,00 *	0,00 *	0,03 *
PS TALLO	1,36	1,41	1,20	0,95	1,63	1,85	5	12	0,00 *	0,14 ns	0,03 *
PSTALLO/ALT	0,015	0,016	0,013	0,010	0,016	0,019	5	11	0,00 *	0,01 *	0,03 *
PS10B	0,21	0,26	0,18	0,23	0,25	0,31	8	9	0,02 *	0,00 *	0,09 *
LENB	3,7	4,5	2,9	3,3	5,5	6,1	17	14	0,00 *	0,00 *	0,31 ns
D.EXT.MAX.C	3,45	3,31	3,17	3,05	3,73	3,75	4	4	0,00 *	0,00 *	0,10 ns
RQ	1,6	1,1	1,3	0,9	2,1	1,4	15	14	0,04 *	0,00 *	0,16 ns
EPEB	0,68	0,98	0,50	0,79	0,88	1,12	7	7	0,00 *	0,00 *	0,02 *
D.FERET.INT.MÍN	1,6	1,9	1,2	1,3	2,5	2,2	13	8	0,00 *	0,00 *	0,00 *
D.FERET.INT.MAX	2,1	2,4	1,6	1,7	3,2	3,1	12	8	0,00 *	0,00 *	0,00 *
D.FERET.EXT.MÍN	3,5	4,2	3,0	3,2	4,5	4,7	4	4	0,00 *	0,00 *	0,00 *
D.FERET.EXT.MAX	4,1	4,9	3,5	3,7	5,3	5,6	4	4	0,00 *	0,00 *	0,00 *
PERÍMETRO	25	25	18	21	33	29	17	10	0,00 *	0,65 ns	0,02 *
ÁREA.INT	2,4	3,4	1,4	1,7	4,3	5,0	18	12	0,00 *	0,00 *	0,00 *
ÁREA.EXT	9	12	6	7	14	14	8	8	0,00 *	0,00 *	0,00 *
ÁREA.PARED	6	9	4	6	9	10	11	10	0,00 *	0,00 *	0,00 *
$J_x$	6,1	5,9	3,9	4,2	8,5	9,3	15	15	0,00 *	0,34 ns	0,14 ns
$\sigma$	47	34	33	24	55	46	22	18	0,39 ns	0,00 *	0,60 ns

\* Diferencias significativas ( $p < 0,1$ ), ns: diferencias no significativas.

### 3.3.1. Asociación entre variables

La asociación entre las variables evaluadas que presentaron diferencias significativas entre cultivares (según ANVA) se presenta en la Tabla 6. El índice de vuelco se asoció significativamente con tres de las variables: *ALTURA*, *D.EXT.MAX.C*, y  $J_x$ . La asociación entre el  $\Delta IV$  y las variables medidas se presenta en la Figura 8. A.

Entre las variables medidas en el entrenado basal, el *PS10B* presentó una asociación significativa con las variables *PSTALLO*, *PSTALLO/ALT* y las características geométricas del entrenado basal, excepto con *EPEB*. Por otra parte, las variables obtenidas mediante el análisis automático de imágenes presentaron asociación significativa entre sí y con la variable *D.EXT.MAX.C* y el  $J_x$ .

Tabla 6. Coeficientes de correlación entre las variables evaluadas. Los valores en negrita denotan asociaciones significativas ( $p < 0,05$ ). La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1 ALTURA																									
2 PSG	-0,26																								
3 NUM.ESP	0,10	0,53																							
4 PS/ESP	-0,07	-0,02	<b>-0,77</b>																						
5 PSG/ESP	-0,30	0,15	<b>-0,74</b>	<b>0,93</b>																					
6 IC	<b>-0,55</b>	0,09	-0,42	0,41	<b>0,61</b>																				
7 PST	0,19	<b>0,74</b>	<b>0,72</b>	-0,29	-0,30	<b>-0,59</b>																			
8 PSV	0,05	0,05	<b>-0,68</b>	<b>0,87</b>	<b>0,81</b>	0,04	0,00																		
9 PSTALLO	0,23	0,14	-0,32	0,43	0,39	-0,42	0,37	<b>0,81</b>																	
10 PSTALLO/ALT	-0,33	0,26	-0,36	0,45	0,54	-0,12	0,25	<b>0,76</b>	<b>0,84</b>																
11 PS10B	-0,01	0,01	-0,53	0,44	0,48	-0,02	-0,02	<b>0,66</b>	<b>0,68</b>	<b>0,66</b>															
12 LENB	-0,20	<b>0,63</b>	<b>0,55</b>	-0,25	-0,13	0,01	0,52	-0,19	-0,10	0,02	-0,30														
13 D.EXT.MAX.C	-0,38	0,18	-0,35	0,29	0,41	0,15	-0,01	0,41	0,40	<b>0,61</b>	<b>0,76</b>	-0,13													
14 RQ	-0,01	0,10	-0,37	0,42	0,40	-0,12	0,13	<b>0,61</b>	<b>0,60</b>	<b>0,59</b>	<b>0,70</b>	-0,12	<b>0,64</b>												
15 EPEB	-0,20	-0,29	<b>-0,70</b>	<b>0,62</b>	<b>0,54</b>	0,06	-0,31	<b>0,64</b>	0,45	<b>0,56</b>	0,50	-0,34	<b>0,67</b>	<b>0,54</b>											
16 D.FERET.INT.MÍN	-0,14	-0,08	-0,32	0,08	0,23	0,23	-0,25	0,14	0,16	0,23	<b>0,63</b>	-0,51	<b>0,67</b>	0,19	0,27										
17 D.FERET.INT.MAX	-0,18	0,01	-0,40	0,20	0,37	0,31	-0,24	0,25	0,24	0,33	<b>0,71</b>	-0,46	<b>0,71</b>	0,27	0,31	<b>0,97</b>									
18 D.FERET.EXT.MÍN	-0,21	-0,15	-0,39	0,17	0,25	0,12	-0,25	0,22	0,21	0,33	<b>0,61</b>	-0,51	<b>0,78</b>	0,23	<b>0,58</b>	<b>0,90</b>	<b>0,87</b>								
19 D.FERET.EXT.MAX	-0,23	-0,07	-0,46	0,28	0,38	0,19	-0,24	0,34	0,30	0,43	<b>0,71</b>	-0,48	<b>0,83</b>	0,32	<b>0,59</b>	<b>0,91</b>	<b>0,92</b>	<b>0,98</b>							
20 PERÍMETRO	-0,23	0,08	-0,30	0,16	0,30	0,14	-0,08	0,27	0,31	0,43	<b>0,75</b>	-0,39	<b>0,74</b>	0,26	0,33	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	<b>0,89</b>	<b>0,92</b>						
21 ÁREA.INT	-0,22	-0,01	-0,34	0,13	0,28	0,29	-0,25	0,15	0,12	0,24	<b>0,66</b>	-0,45	<b>0,78</b>	0,23	0,38	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,93</b>	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>					
22 ÁREA.EXT	-0,20	-0,14	-0,43	0,24	0,31	0,10	-0,23	0,32	0,31	0,42	<b>0,65</b>	-0,49	<b>0,80</b>	0,29	<b>0,65</b>	<b>0,87</b>	<b>0,85</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>				
23 ÁREA.PARED	-0,17	-0,19	-0,45	0,28	0,31	-0,01	-0,19	0,39	0,38	0,48	<b>0,59</b>	-0,48	<b>0,76</b>	0,29	<b>0,74</b>	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>0,79</b>	<b>0,79</b>	<b>0,98</b>			
24 $J_x$	-0,36	0,21	-0,33	0,28	0,41	0,15	0,02	0,41	0,41	<b>0,61</b>	<b>0,75</b>	-0,10	<b>0,99</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>	<b>0,64</b>	<b>0,68</b>	<b>0,73</b>	<b>0,79</b>	<b>0,69</b>	<b>0,74</b>	<b>0,75</b>	<b>0,70</b>		
25 $\sigma$	0,46	-0,01	0,28	-0,11	-0,24	-0,25	0,21	-0,11	-0,07	-0,33	-0,43	0,16	<b>-0,80</b>	-0,09	<b>-0,60</b>	<b>-0,66</b>	<b>-0,65</b>	<b>-0,85</b>	<b>-0,84</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,79</b>	<b>-0,85</b>	<b>-0,81</b>	<b>-0,78</b>	

### 3.3.2. Modelos explicativos del vuelco

#### 3.3.2.1. Modelos propuestos por la bibliografía

Los cultivares fueron caracterizados por su coeficiente de seguridad del tallo (CS) y por la velocidad de ráfaga que produciría vuelco ( $V_{gs}$ ) expresados como desvíos del promedio ( $\Delta CS$  y  $\Delta V_{gs}$ , respectivamente). Ambas variables presentaron asociaciones significativas ( $p < 0,05$ ) y negativas con el  $\Delta IV$  (Figura 5, Figura 6).

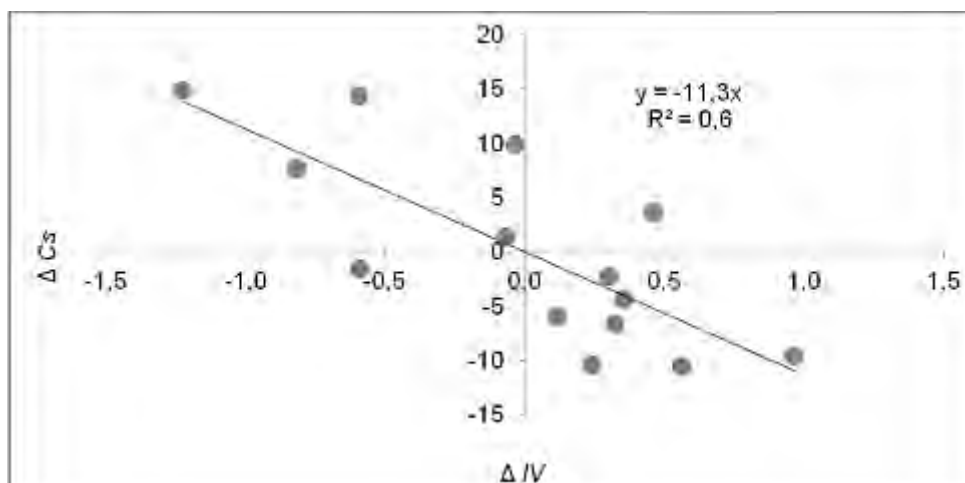


Figura 5. Relación entre el desvío del índice de vuelco ( $\Delta IV$ ) y el desvío del coeficiente de seguridad del tallo de los cultivares evaluados ( $\Delta CS$ ).

A partir de las mediciones realizadas en los experimentos BAT10 y BAT11 en madurez, la estimación del riesgo de vuelco evaluada por medio de  $V_{gs}$  (modelo propuesto por Berry *et al.*, 2003a) presentó una mayor asociación con el  $\Delta IV$  de los cultivares evaluados ( $R^2 = 0,72$ ; Figura 6) que el modelo basado en CS.

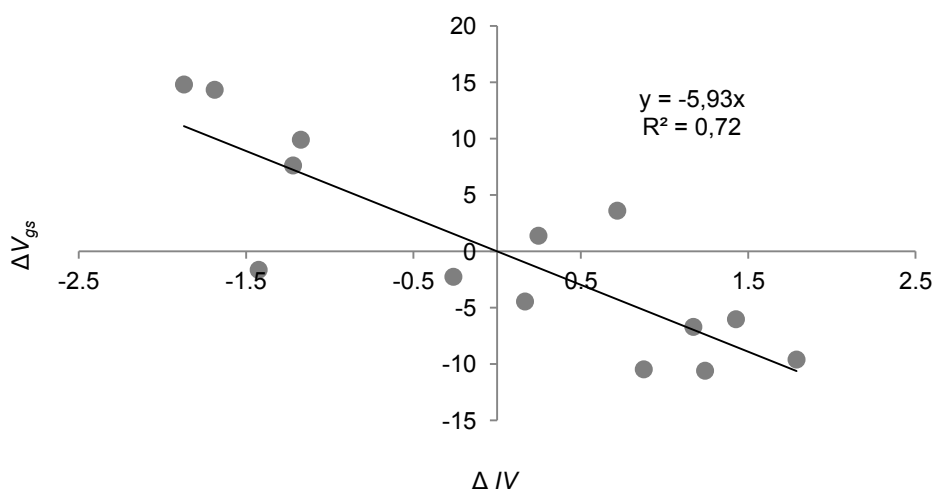


Figura 6. Relación entre el desvío del índice de vuelco ( $\Delta IV$ ) y el desvío del coeficiente de seguridad del tallo de los cultivares evaluados ( $\Delta V_{gs}$ ).

A partir de los valores promedio de las variables medidas en los experimentos BAT10 y BAT11, se realizó un análisis de sensibilidad de  $V_{gs}$ , el cual mostró que dentro de un rango  $\bar{-} / \bar{-} /$  las variables que afectan el riesgo de vuelco lo hicieron linealmente (Figura 7) excepto para *EPEB*, tal como surge de las Ec. [1] y Ec. [2]. El ajuste de los parámetros empíricos presentes en el modelo de Berry *et al.* (2003a) no permitió mejorar la estimación de la susceptibilidad al vuelco de los cultivos evaluados en este estudio.

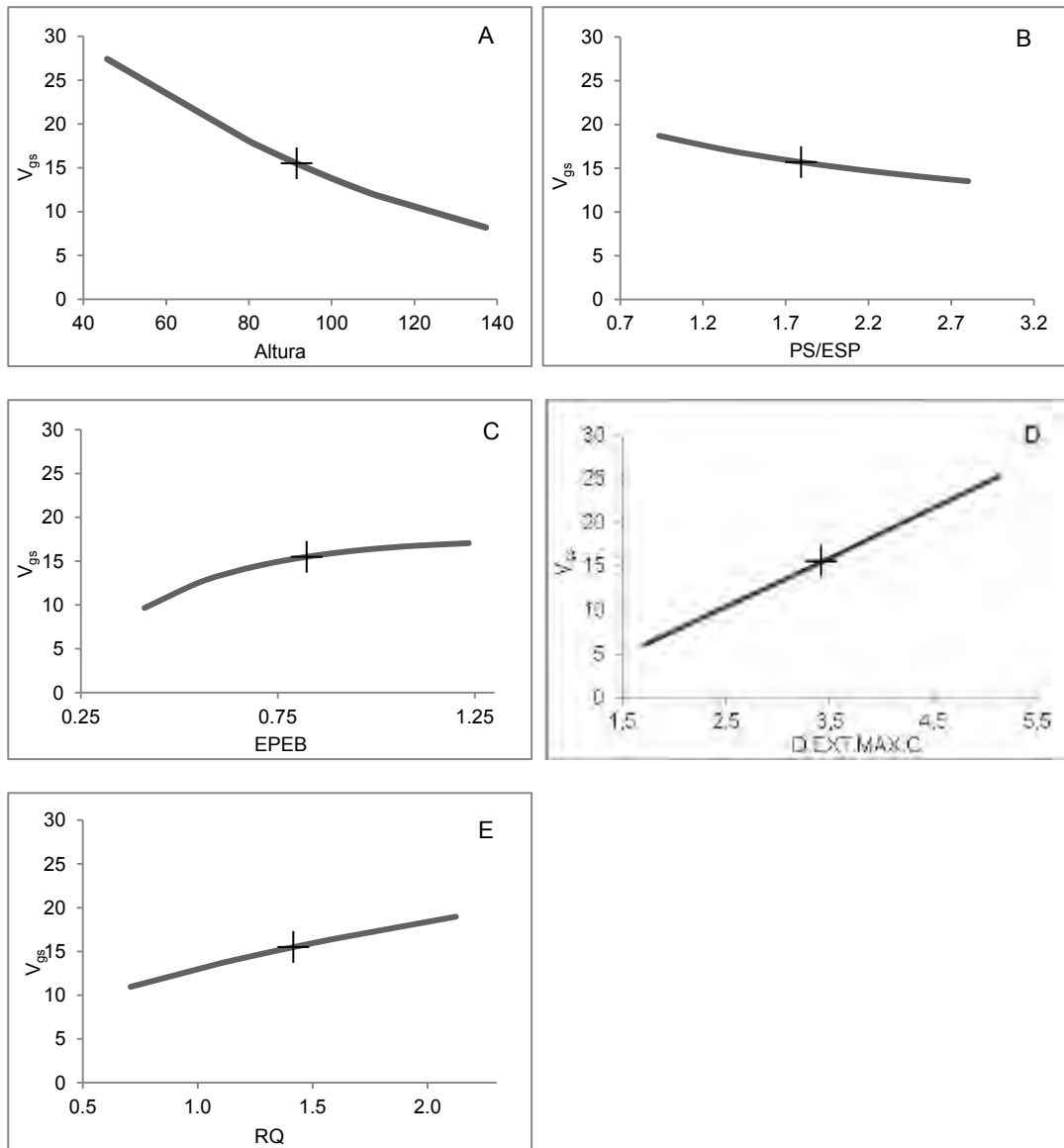


Figura 7. Variación en riesgo de vuelco, calculado como velocidad de ráfaga que produciría la falla del tallo ( $V_{gs}$ ), debida a la variación en variables medidas en planta y/o en la base del tallo. A: ALTURA; B: PS/ESP; C: EPEB; D: D.EXT.MAX.C; E: RQ.



### 3.3.2.2. Modelo generado a partir de los datos de los experimentos BAT10 y BAT11

Dado el comportamiento lineal de las diferentes variables con que se asocia el riesgo de vuelco (Figura 7), se analizó la asociación entre y la matriz de variables medidas, expresándolas como desvíos del promedio de los cultivares comparados, y utilizando el criterio de inclusión de variables "stepwise". Al considerar la inclusión de la primera variable, sólo tres presentaron asociaciones significativas ( $p < 0,05$ ): *ALTURA*, *D.EXT.MAX.C* y  $J_x$  ( $R^2=0,50$ ;  $R^2=0,35$  y  $R^2=0,35$ , respectivamente). Al retener la *UR* en el modelo, el *PS/ESP*, el *PSG/ESP* y el *IC* presentaron los mayores valores de  $R^2$ , si bien las diferencias entre sus  $R^2$  no fueron significativas (Figura 4). La segunda variable que se incorporó al modelo fue entonces el */ESP*. Al retener *UR* y */ESP*, la tercera variable incorporada al modelo fue el  $J_x$ . Finalmente, el modelo lineal obtenido aplicable a un cultivar *i* fue:

$$\text{Ec. [12]} \Delta \quad 0,9 \Delta A \quad R \quad A_i \quad , \quad 1 \Delta S \quad S \quad i - , \quad 9 \Delta J \quad i \quad (R \quad 0,91 \text{ g.l. } 11 \text{ p } 0,001)$$

El ajuste del modelo correspondiente a la Ec. [12] resultó mayor que el que se alcanzó aplicando el modelo propuesto por Berry *et al.* (2003a) ( $R^2$  0,91 vs. 0,72, respectivamente) y la relación entre el estimado y el observado (Figura 9) presentó una pendiente estadísticamente igual a uno. Los valores de cada cultivar para las variables que resultaron significativas se presentan en la Tabla 7.

*Tabla 7. Valores de PSG, Altura, PS/ESP,  $J_x$ , D.EXT.MAX.C, EPEB y RQ de los cultivares utilizados para generar el modelo, expresados como desvíos del promedio, y promedio general.*

	PSG (g/m <sup>2</sup> )	ALTURA (cm)	PS/ESP (g)	$J_x$ (mm <sup>4</sup> )	D.EXT.MAX.C (mm)	EPEB (mm)	RQ (N)
ACA 201	-35,5	-1,9	0,1	-0,3	-0,03	0,15	-0,01
ACA 315	-44,1	8,3	-0,3	-1,1	-0,14	-0,01	0,00
ACA 320	-29,0	0,2	-0,2	-1,1	-0,13	-0,04	-0,03
B, SY 200	89,7	2,2	-0,4	-1,9	-0,25	-0,15	-0,18
Baguette 10	-20,2	-4,8	-0,1	1,5	0,22	0,08	0,00
Baguette 30	26,3	0,5	0,2	2,9	0,35	0,37	0,13
Baguette 31	-44,7	-10,2	0,0	-0,7	-0,08	-0,09	0,06
Baguette Premium 11	37,7	-4,2	-0,3	1,0	0,08	-0,07	-0,05
BIOINTA 3005	56,6	-1,8	0,2	0,6	0,09	0,04	0,00
Buck Poncho	-85,9	4,1	-0,1	0,2	0,05	-0,18	0,03
Klein Gladiador	18,6	4,3	0,1	-1,0	-0,14	-0,05	-0,02
Klein Guerrero	-18,6	8,9	0,2	-0,2	-0,03	0,06	0,02
SRM 2330	-40,5	2,2	0,3	-1,1	-0,17	-0,09	-0,01
SRM Nogal	89,5	-7,9	0,2	1,3	0,18	-0,03	0,06
Promedio	675	92,1	1,86	5,98	3,38	1,36	0,83

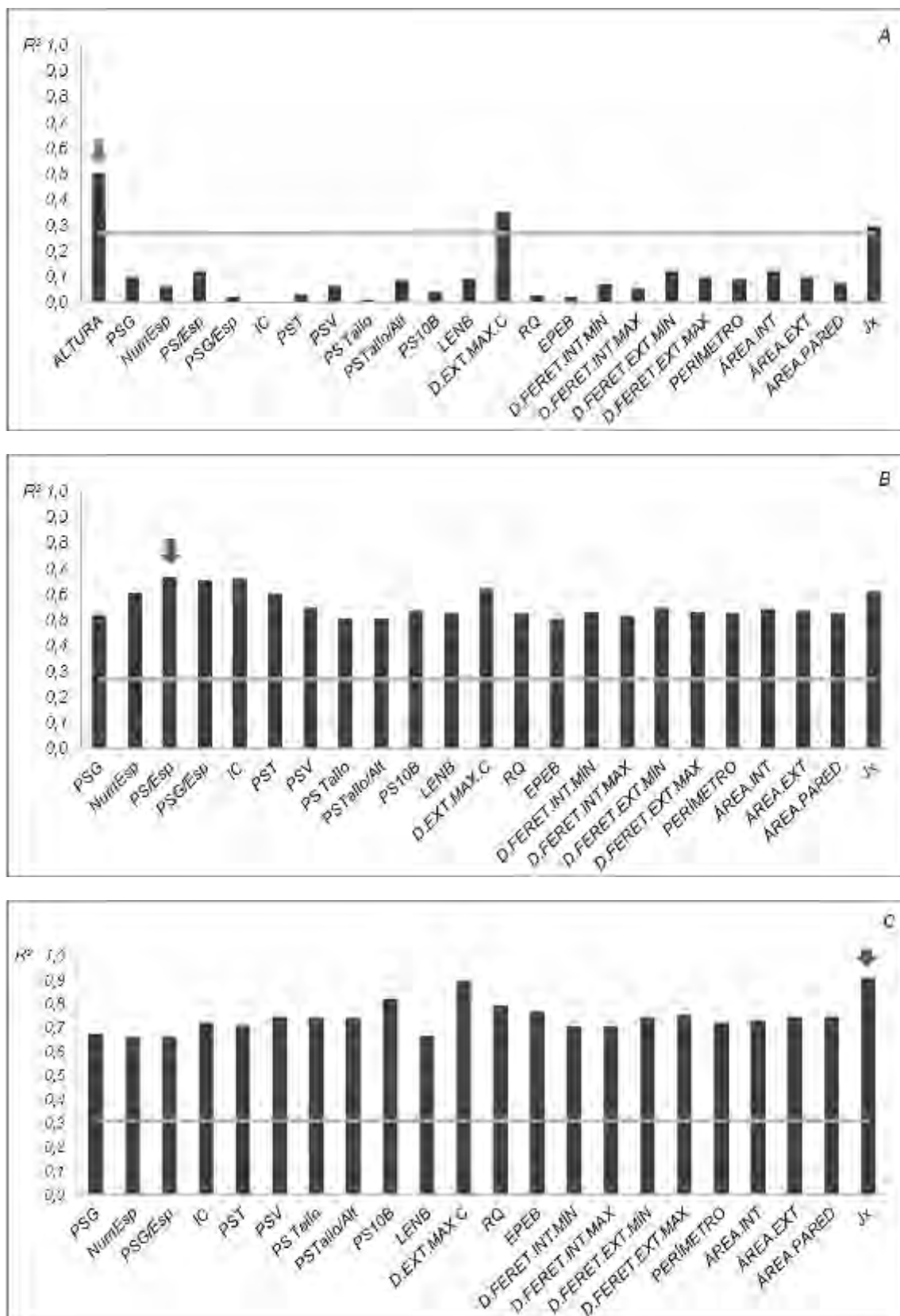


Figura 8. Comparación de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre el grado de susceptibilidad al vuelco y las variables analizadas. La línea gris indica el  $R^2$  significativo al 5%, la flecha indica la variable incluida en cada paso de la regresión lineal múltiple. (A) Primera variable incorporada al modelo lineal; (B) A partir de la

retención de la variable ALTURA, segunda variable incorporada al modelo; (C) A partir de la retención de la ALTURA y el PS/ESP, tercera variable incorporada al modelo.

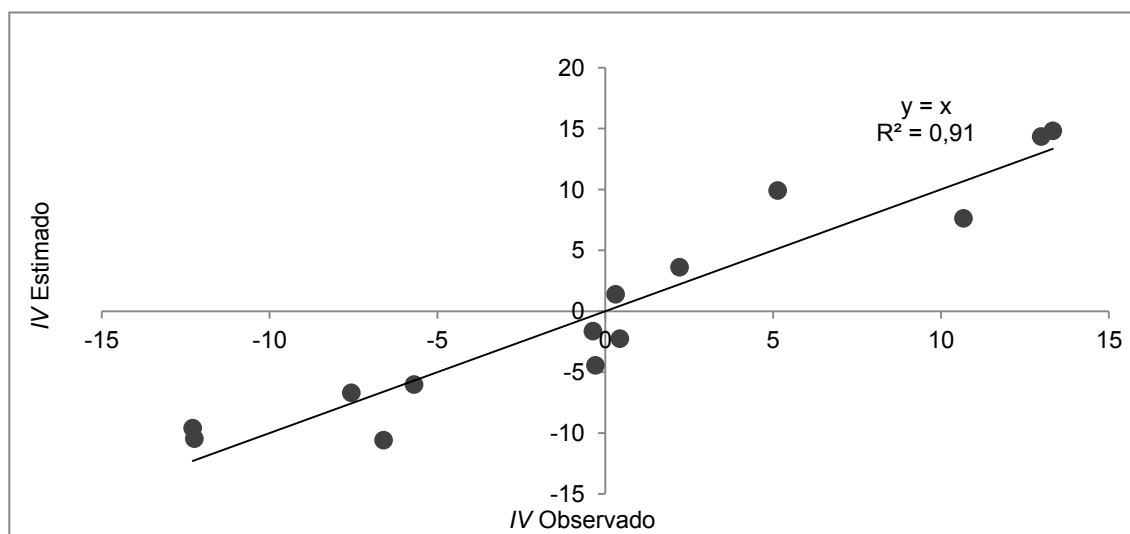


Figura 9. Relación entre el  $IV$  observado y el  $IV$  estimado mediante la Ec. [12], de los 14 cultivares utilizados para generar el modelo por regresión lineal múltiple.

A fin de validar el modelo correspondiente a la Ec. [12] se contrastó el  $IV$  observado de 10 cultivares (no utilizados en la construcción del modelo) de los experimentos BAT10 y BAT11. Los valores de  $IV$  observados se asociaron significativamente, con un  $R^2=0,66$  ( $gl=7$ ;  $p=0,008$ ) con ordenada al origen estadísticamente igual a cero ( $p=0,61$ ) y pendiente no diferente de 1 ( $p<0,01$ ). A su vez, el ordenamiento categórico de los cultivares no presentó diferencias significativas ( $p<0,001$ ) de clasificación según los valores de  $IV$  observados y estimados mediante la Ec. [12]. Por otra parte, se calculó el  $gs$  de estos cultivares, y esta variable no estuvo significativamente asociada al  $IV$  observado ( $R^2 = 0,29$ ;  $gl=9$ ;  $p=0,087$ ).

Tabla 8. Valores de  $RET$ ,  $PSG$ ,  $Altura$ ,  $PS/ESP$ ,  $J_x$ ,  $RQ$  y  $gs$  de los cultivares utilizados para validar el modelo propuesto (Ec. [12]).

Cultivar	promedio RET	Experimento	G ( $g/m^2$ )	U (cm)	R (g)	$J_x$ ( $mm^4$ )	RQ (N)	$gs$ ( $m/s$ )
Baguette 17	-0,47	BAT10	-3,71	0,14	-0,11	0,00	0,07	-3,71
Baguette 18	-2,80	BAT10	-0,71	0,08	1,63	1,44	-0,01	-0,71
BIOINTA 2004	3,56	BAT10	-8,96	0,06	-2,36	-2,35	0,27	-8,96
BIOINTA 3004	-1,80	BAT10	3,29	0,04	1,63	1,44	-0,42	3,29
Buck Taita	-1,14	BAT10	2,54	-0,51	0,39	0,43	-0,23	2,54
Klein Carpincho	4,53	BAT10	10,04	0,13	0,16	0,24	0,27	10,04
SY100	-1,53	BAT10	-2,46	0,04	-1,35	-1,21	0,04	-2,46
Baguette 19	-4,62	BAT11	-5,78	-0,05	0,63	0,59	0,09	-5,78
SY 110	0,87	BAT11	2,56	0,01	-0,27	-0,25	-0,04	2,56
SY 300	3,41	BAT11	3,22	0,03	-0,37	-0,35	-0,05	3,22
Promedio IV	4,80	Promedio BAT10	718,7	97,0	3,4	2,2	1,5	6,2
		Promedio BAT11	716,0	91,3	3,2	1,5	1,0	4,5

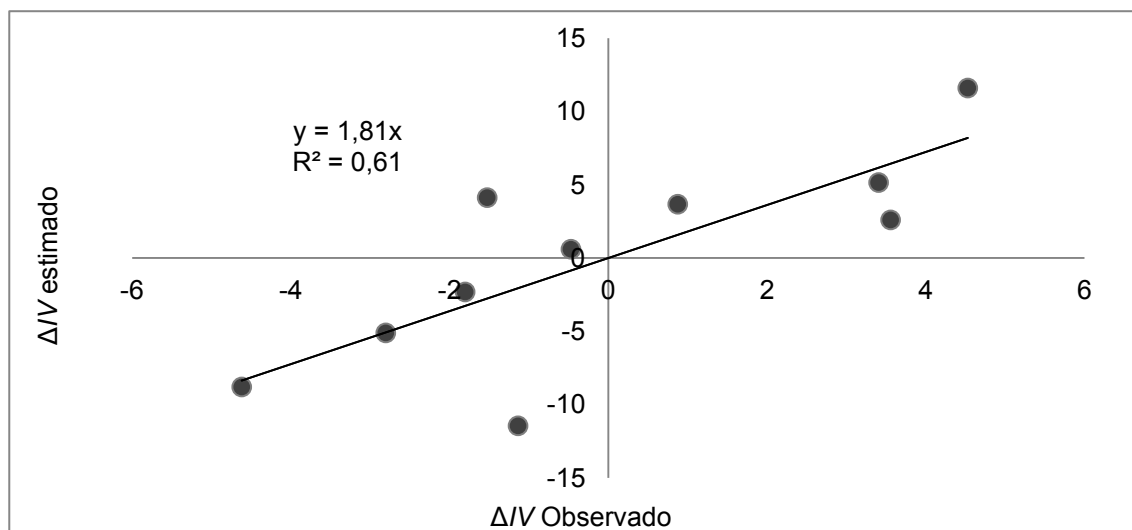


Figura 10. Relación entre el observado y el estimado mediante la Ec. [12] de los cultivares utilizados para validar el modelo.

### 3.4. Experimento con diferentes condiciones de manejo

El rendimiento en grano (PSG) no presentó interacción tratamiento x cultivar y se observó una reducción del PSG en los tratamientos de manejo (camas, corte y sombreado), excepto en el caso de reducción de la densidad de siembra (Tabla 9).

La *ALTURA* no presentó interacción tratamiento x cultivar ( $p=0,48$ ), ni diferencias significativas entre cultivares ( $p=0,68$ ) pero sí presentó efecto de los diferentes tratamientos ( $p<0,0001$ ) (Tabla 9). La reducción de la radiación interceptada (por medio de sombreado) y de la biomasa (por medio de corte mecánico) durante el macollaje fueron los tratamientos que más redujeron la altura.

La variable *PS/ESP* no presentó diferencias entre cultivares, pero sí efecto de los tratamientos de manejo y de la interacción manejo x cultivar ( $p<0,05$ ) (Tabla 9). Si bien en la mayoría de los tratamientos de manejo el valor de *PS/ESP* del cultivar SY 110 fue igual o mayor al de Baguette 10, con sombreado se invirtió el orden de los cultivares, dando origen a la interacción significativa.

La variable *D.EXT.MAX.C* y el  $J_x$  no presentaron interacción manejo x cultivar ( $p=0,52$ ;  $p=0,59$ ) ni diferencias entre las condiciones de manejo ( $p=0,24$ ;  $p=0,18$ ) (Tabla 9). Se detectaron diferencias entre cultivares para ambas variables ( $p<0,001$ ), y el cultivar Baguette 10 presentó mayores valores en todos los casos. Por otra parte, la variable *RQ* no mostró efecto de la interacción manejo x cultivar ( $p=0,28$ ) ni de los cultivares ( $p=0,59$ ), pero sí de los diferentes manejos ( $p<0,001$ ); así, con respecto al testigo, el sombreado redujo el valor de la variable *RQ* y la siembra en camas lo aumentó.

Finalmente, el estimado mediante la Ec. [12] no presentó interacción tratamiento x cultivar ( $p=0,71$ ), pero sí diferencias entre las condiciones de manejo de cultivo y los cultivares evaluados ( $p<0,001$ ). Según este modelo, los tratamientos de sombreado y corte presentarían el mayor riesgo de vuelco; por su parte, el cultivar SY110 presentaría mayor riesgo de vuelco que Baguette 10 bajo todas las condiciones de cultivo evaluadas.

*Tabla 9. Efecto de las condiciones de manejo del experimento BM13 sobre el rendimiento (PSG), la altura del cultivo (ALTURA), el diámetro de la base del tallo (D.EXT.MAX.C), el peso seco/espiga (PS/ESP) y el índice de vuelco (IV) estimado. La descripción de las variables se presenta en la Tabla 2.*

Manejo	Variable	PSG (g/m <sup>2</sup> )		ALTURA (cm)		PS/ESP (g/esp.)		J <sub>x</sub> (mm <sup>4</sup> )		IV (%)	
		B10	SY 110	B10	SY 110	B10	SY 110	B10	SY 110	B10	SY 110
Testigo		621	614	90,0	91,0	1,4	1,5	10,2	5,7	-0,1	18,9
Densidad		584	619	91,3	90,5	1,6	1,9	8,7	7,3	10,3	20,8
Camas		530	533	89,0	91,3	1,6	1,7	10,0	6,6	5,7	21,3
Sombreado		440	368	83,5	81,3	1,2	0,9	9,3	6,6	-11,5	-5,6
Corte		384	337	80,3	81,7	1,0	1,1	6,7	5,0	-8,1	4,7
Sign.	M x C	Ns		ns		*		Ns		ns	
	M	*		*		ns		Ns		*	
	C	Ns		ns		ns		*		*	
MDS <sup>a</sup>	M x C	---		---		0,2		---		---	
	M	57		2,9		---		---		10,0	
	C	---		---		---		1,4		6,4	

<sup>a</sup>MDS: mínima diferencia significativa para realizar comparaciones.

#### 4. DISCUSIÓN

El vuelco es un fenómeno que se presenta esporádicamente, producto de la interacción cultivo x suelo x clima; por ello es difícil caracterizar el comportamiento de los cultivares y el efecto de las prácticas de manejo. En este trabajo se logró caracterizar consistentemente la susceptibilidad al vuelco de un conjunto de cultivares difundidos en la región pampeana, y explicar este comportamiento con variables de fácil medición registradas en madurez (Ec. [12]). Además, se validó el modelo teórico propuesto por Berry *et al.* (2003a) y se obtuvo un nuevo modelo empírico, que presentó un mejor ajuste que éste, para explicar la susceptibilidad al vuelco de un amplio grupo de cultivares difundidos en el sudeste bonaerense en condiciones de alta tecnología.

Diversos autores han planteado la dificultad que implica la evaluación del fenómeno del vuelco en condiciones naturales, debido a su naturaleza ocasional y aleatoria (Sterling *et al.*, 2003; Berry *et al.*, 2004; Kelbert *et al.*, 2004a). Si bien en el experimento BAT10 los valores de vuelco registrados fueron bajos (IV promedio=3,4) y sólo presentaron vuelco los cultivares más susceptibles, con los datos de los experimentos BAT11 (IV promedio=8,8) y BVU13 (IV promedio=19) se logró caracterizar de manera consistente dicha susceptibilidad en los cultivares estudiados, a través del promedio de los desvíos del IV de cada cultivar respecto del promedio general de cada experimento. La aplicación de doble lámina de riego entre fin de macollaje y madurez permitió aumentar los valores absolutos de vuelco en el experimento BVU13, en relación al experimento de la RET-AT de 2013 (IV promedio=8,3; datos no mostrados). El hecho de que este comportamiento, expresado como desvío del promedio, sea consistente entre los experimentos de la RET-AT y el experimento BVU13, confirma que es posible realizar experimentos maximizar el vuelco con condiciones de altas dosis de insumos, en coincidencia con lo ya reportado por Loyce *et al.* (2008). La dificultad para caracterizar la susceptibilidad al vuelco, reportada en la bibliografía, puede estar asociada con condiciones de cultivo no potenciales, con limitaciones hídricas o nutricionales, y no sólo con las condiciones climáticas no favorables al vuelco de un año en particular.

Los cultivares estudiados presentaron diferencias significativas para la mayoría de las variables evaluadas, y en cada caso la interacción genotipo x ambiente (IGA) fue baja o nula. De manera similar, Tripathi *et al.* (2003) encontraron variabilidad entre los cultivares estudiados y efecto ambiental sobre las variables longitud, diámetro del entrenudo basal y espesor de pared, sin efecto de IGA. Contrariamente, Berry *et al.* (2000; 2015) detectaron IGA significativas para todas las variables mencionadas. El

rango de valores de momento máximo en la base del tallo (110-175 N mm) fue similar al reportado por Berry *et al.* (2003a). Las diferencias en fuerza de quiebre, al menos para este conjunto de cultivares, fueron debidas a diferencias en diámetro y espesor de la pared del tallo, más que a variaciones en la resistencia material del entrenudo basal, variable que no presentó diferencias significativas entre cultivares. Los rangos de valores de diámetro y resistencia material registrados (3,1- 3,7 mm; 28-50 MPa) fueron similares a los reportados por Berry *et al.* (2003a; 2007), en tanto que el espesor de pared mínimo fue similar y el valor máximo fue mayor para los cultivares argentinos estudiados (0,65-1,00 mm). El uso de fotografías digitales para la medición del espesor de pared y el diámetro de tallo mostró buena capacidad predictiva, pero no fue más fácil ni rápido que realizar las mediciones con calibre digital. El análisis del *EPEB* en las fotografías mostró que ésta es una variable homogénea en una sección transversal del tallo dada, ya que los valores promedio y el coeficiente de variación al aumentar el tamaño de la muestra se mantuvieron cuando se realizaron una, dos o cuatro mediciones por tallo; esto indica que una medición por tallo es suficiente para determinar esta variable, al menos para los cultivares evaluados en este estudio.

La reducción de altura lograda con la introducción de los genes de enanismo durante la Revolución Verde aumentó la resistencia al vuelco. Esto también trajo aparejado un aumento en el rendimiento en grano, por una mayor partición a espiga. A lo largo de los últimos 20 años el rendimiento ha continuado incrementándose, en tanto que, en promedio, la altura de los cultivares se ha estabilizado. Esto puede observarse, por ejemplo, al analizar datos históricos provenientes de la RET Balcarce (Figura 11). Sin embargo, entre los cultivares semienanos de alto rendimiento estudiados en este trabajo, la altura explicó una gran proporción (50%) de las diferencias en su susceptibilidad al vuelco. Pinthus (1973), Baker *et al.* (1998), Cruz *et al.*, (2001), Berry *et al.* (2004), Kelbert *et al.* (2004a) y Berry *et al.* (2015), entre otros, hallaron resultados similares, en tanto que otros autores como Zuber *et al.* (1999) y Tripathi *et al.* (2003) no encontraron asociación significativa entre los valores de vuelco registrados y la altura.

La altura de la planta en la parcela es de fácil medición y presentó un bajo coeficiente de variación experimental (<5%); además no mostró IGA significativa. La altura registrada en los experimentos reportados en este trabajo presentó un rango de variación de 20%, con una altura mínima de 82 cm, que se encuentra por encima del límite mínimo de altura (70 cm) reportada por varios autores (Allan, 1986; Flintham *et al.*, 1997; Berry *et al.*, 2007).

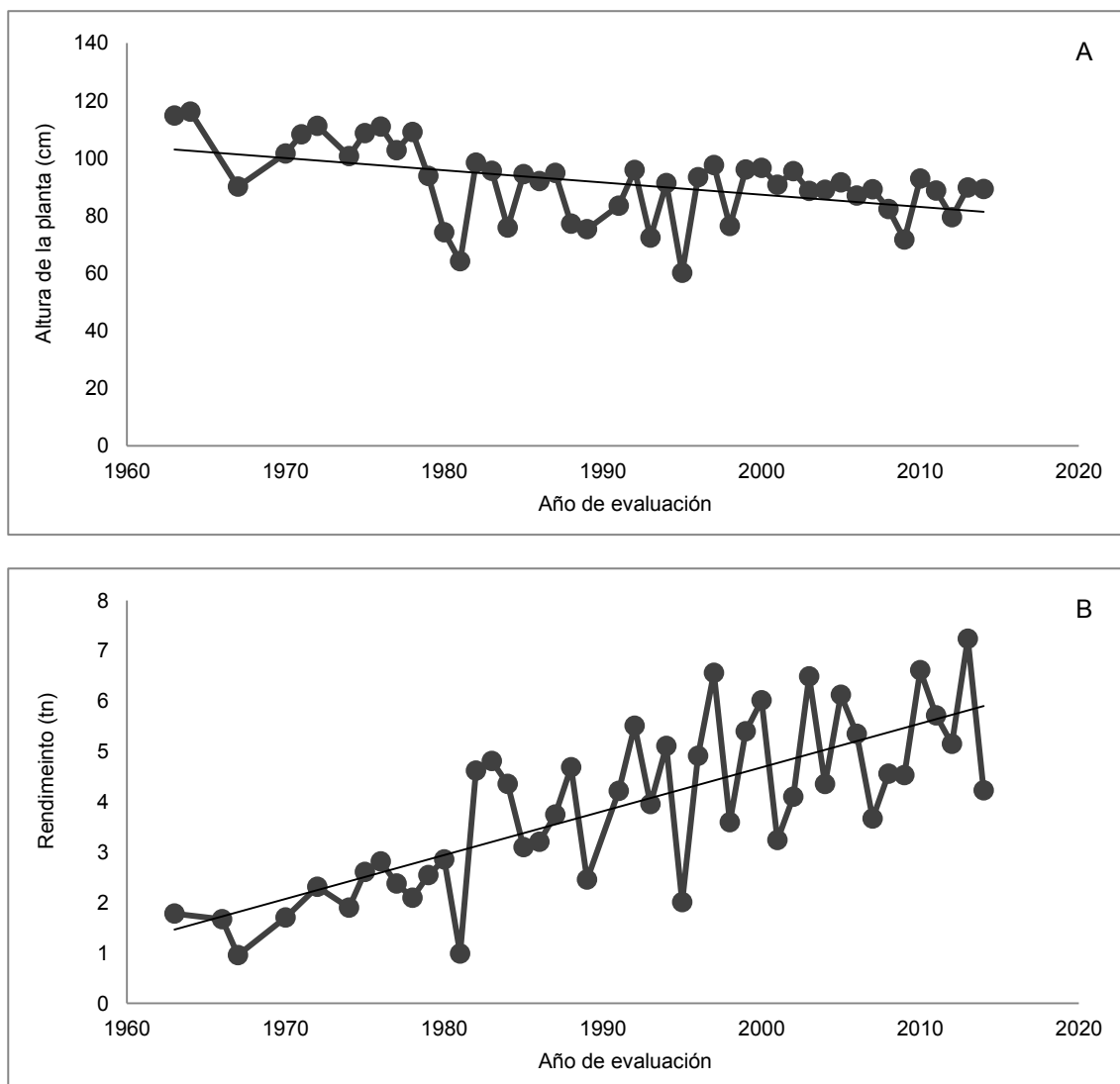


Figura 11. Evolución histórica de (A) la altura de planta (cm) y (B) el rendimiento en grano (tn) en la RET Balcarce.

Al evaluar la asociación entre la susceptibilidad al vuelco con el coeficiente de seguridad de tallo (CS; Crook *et al.*, 1994) y con la velocidad de ráfaga requerida para producir vuelco ( $V_{gs}$ ; Berry *et al.*, 2003a) se encontraron asociaciones negativas. El grado de asociación entre los valores de vuelco registrados a campo y los valores estimados por el modelo de  $V_{gs}$  (Ec. [6]; Figura 6;  $R^2=0,72$ ) fue superior al reportado por Berry *et al.* (2003a) al validar su modelo ( $R^2=0,65$ ). Las variables seleccionadas por el modelo empírico obtenido en el presente estudio a partir de un análisis de regresión lineal múltiple (Ec. [12]) son las mismas que se consideran en los modelos teóricos propuestos por la bibliografía. Sin embargo, el ajuste obtenido fue mayor ( $R^2=0,91$ ). Por otra parte, la validación del modelo propuesto con otro grupo de cultivares mostró que el ordenamiento de los mismos en categorías de diferente susceptibilidad al vuelco fue igual que el establecido con los IV observados a campo. Este modelo permitiría separar grupos de mayor y menor susceptibilidad ante



condiciones predisponentes al vuelco. Además permitiría caracterizar líneas avanzadas del programa de mejoramiento a partir de la comparación con cultivares de comportamiento conocido.

Los datos del experimento BM13 permitieron estudiar el efecto de ciertas prácticas de manejo sobre los caracteres asociados al vuelco. Al estimar el  $J_x$  a partir de los datos de ese experimento mediante el modelo de la Ec. [12], la susceptibilidad al vuelco no presentó interacción cultivar x manejo. El cultivar SY110 mostró mayores valores de  $J_x$  que Baguette 10 en todos los casos, lo cual es consistente con los valores de IV observados para estos dos cultivares en diferentes ciclos agrícolas de la RET-AT de INTA Balcarce. Existe consenso respecto de que la menor densidad de siembra, la siembra en camas y la reducción de biomasa mediante corte (tratamientos que fueron incluidos en el experimento BM13) reducen la susceptibilidad al vuelco. Esta menor susceptibilidad se debería al aumento de RQ, variable que en este experimento no presentó diferencias entre cultivares pero sí entre manejos, mientras las diferencias en *D.EXT.MAX.C* y EPEB se presentaron entre cultivares y no entre manejos. Esta observación es coincidente con lo encontrado por Berry *et al.* (2000), quienes reportaron que las diferentes prácticas de manejo afectaron de manera independiente a la resistencia material y a los caracteres diámetro de tallo y espesor de pared. Si bien puede ser factible reducir la susceptibilidad al vuelco a través del manejo del cultivo, los resultados de la Tabla 9 indican que la posibilidad de alcanzar ese objetivo puede estar acompañada de un menor PSG.

Según el modelo empírico generado en este estudio (Ec. [12]), un aumento en el valor de las variables *ALTURA* y *PS/ESP* incrementaría la susceptibilidad al vuelco, en tanto que un mayor valor del  $J_x$  la reduciría. A partir del valor mínimo de altura observado en el presente estudio (81 cm, 12% por debajo del promedio) y los valores promedio de rendimiento (7,9 tn/ha con 14% de humedad), *PS/ESP* (1,86 g) y  $J_x$  (5,98 mm<sup>4</sup>), el modelo empírico permite estimar que un genotipo con estas características presentaría una reducción del 10% de la susceptibilidad al vuelco con respecto a aquél que tuviera una altura igual al promedio (92 cm). Esta altura de referencia, 81 cm, resulta sólo 2 cm menor al promedio de la altura óptima propuesta por la bibliografía (Allan, 1986; Flintham *et al.*, 1997; Berry *et al.*, 2007). Al comparar la altura de 60 cultivares evaluados en la RET-AT (con riego complementario) y en la RET en condiciones de secano (“manejo normal”) de I A Balcarce, entre los años 2007 y 2014, se observó en secano una altura promedio 4% menor a la observada bajo riego ( $R^2= 0,47$ ;  $gl=128$ ;  $p<0,001$ ; datos no mostrados). En consecuencia, los 81 cm mencionados arriba corresponderían a 78 cm de altura en la RET con manejo normal,

valor dentro del rango de altura óptima. Por otra parte, si se mantuviera la susceptibilidad al vuelco y se redujera la altura del cultivo a 81 cm se podría aumentar el rendimiento hasta 10,4 tn/ha (humedad 14%), equivalente a un aumento de 32% con respecto al rendimiento registrado en los experimentos BAT10 y BAT11 (7,9 tn). Estas estimaciones ponen de manifiesto que existe la posibilidad de manejar la susceptibilidad al vuelco a través de la altura del cultivar. Sin embargo, la reducción de la altura podría limitar su difusión, ya que un cultivar con altura óptima en Balcarce tendría altura cercana al límite mínimo en una localidad de menor rendimiento. Por ejemplo, una altura de 81 cm en la RET-AT de INTA Balcarce se correspondería con una altura de 72 cm en la RET de Barrow ( $R^2=0,41$ ;  $gl=79$ ;  $p<0,001$ ; datos no mostrados).

Cabe destacar que si bien se podría reducir la altura a 70 cm, lo que ha sido reportado como el límite mínimo compatible con altos rendimientos (Allan, 1986; Flintham *et al.*, 1997; Berry *et al.*, 2007), si esta selección ocurriera en ambientes de alto potencial de rendimiento, la altura de planta sería inferior al mínimo en localidades de menor potencial o en años con estrés término o hídrico que afecten la elongación del tallo. Una altura demasiado reducida puede tener un efecto negativo en el almacenamiento de carbohidratos solubles en tallo y su potencial removilización a grano (Beed *et al.*, 2007) y la distribución de la radiación en la canopia (Miralles y Slafer, 1997), o favorecer el progreso de enfermedades hacia estratos superiores del cultivo (Lovell *et al.*, 2002). Por otra parte, con la disminución de altura se podría reducir el número de hojas y con ello el área foliar, lo que disminuiría la tolerancia del cultivo a defoliación por estreses bióticos (insectos, enfermedades) o abióticos (ocurrencia de granizo, vientos fuertes).

El aumento del rendimiento se puede lograr por medio de un aumento del PST o del IC. Si cualquiera de estos casos se diera sin cambio en otras variables, tendría como consecuencia un aumento en el PS/ESP. En este sentido, Tripathi *et al.* (2003) sugieren que para la selección de materiales de mejor comportamiento al vuelco se debería aumentar el diámetro y el espesor de pared de los entrenudos basales, combinado con un menor número de macollos; un alto rendimiento se podría mantener con un mayor PS/ESP. Sin embargo, en esta situación aumentaría el momento de inercia en la base del tallo y el riesgo de vuelco. Este aumento del momento flector en la base del tallo se podría evitar reduciendo la altura del cultivo, pero esta alternativa podría limitar la difusión del cultivar, tal como se lo señaló más arriba.

Otra posibilidad para reducir el momento flector en la base del tallo es la reducción del PS/ESP y el aumento del número de espigas por unidad de superficie, aunque esto

podría provocar una reducción en la resistencia del tallo por reducción del *D.EXT.MAX.C* y una reducción del PSV que conlleve una reducción de la RQ. En el mismo sentido, un aumento de rendimiento a través del IC provocaría una reducción del PSTALLO y PS10B que ocasionaría una similar reducción en la fuerza de quiebre del tallo. El análisis de sensibilidad muestra que un aumento en el EPEB no reduciría la susceptibilidad al vuelco (Figura 7); sin embargo una reducción del EPEB por debajo del valor mínimo registrado (0,65) afectaría significativamente el  $J_x$  del entrenudo basal, lo que aumentaría la susceptibilidad al vuelco. Por otra parte, la asociación entre el PS10B y el  $J_x$  fue baja, lo que sugiere que se pueden encontrar genotipos con tallos de alta resistencia y bajo peso. Si bien Berry *et al.* (2012) reportaron una asociación significativa entre la resistencia del tallo y el peso fresco por unidad de longitud, la dispersión de los datos observada sugiere que se pueden encontrar casos excepcionales de tallos con baja biomasa y alta resistencia.

Berry *et al.* (2007) y Piñera-Chávez *et al.* (2015) propusieron las características teóricas de un ideotipo de trigo resistente al vuelco para las condiciones del Reino Unido y de México, respectivamente. En ambos trabajos, plantean una reducción de la altura de planta a 70 cm, mínimo EPEB (0,65 mm), resistencia material máxima (50 MPa) y un diámetro del entrenudo basal mínimo (4- 4,45 mm), combinado con un rendimiento objetivo de 8 tn para Reino Unido y 6 tn para México. Las condiciones del sudeste bonaerense difieren de las analizadas por estos autores, por lo que si bien existen coincidencias en algunos caracteres, estos ideotipos no necesariamente ajustan con el ideal para esta región.

La selección de cultivares con buen comportamiento al vuelco se dificulta en regiones con condiciones poco favorables a la ocurrencia de este fenómeno. Por lo tanto, un método efectivo para la selección de dichos cultivares sería su evaluación en un ambiente de alto rendimiento y con condiciones climáticas “favorables” a la ocurrencia de vuelco, como precipitaciones frecuentes y/o abundantes y ráfagas de viento de alta velocidad durante el llenado de granos. Alternativamente, se podría realizar la selección de cultivares por variables asociadas al vuelco como las propuestas por el modelo de la Ec. [12].

La variabilidad observada en el presente estudio en los caracteres asociados a la resistencia del tallo, aún en un grupo limitado de cultivares, podría explicarse porque han sido seleccionados en diferentes ambientes, o bien porque dichos caracteres no han sido intencionalmente explorados en el mejoramiento genético debido a la falta de metodologías de evaluación simples y rápidas (Crook *et al.*, 1994; Berry *et al.*, 2007). Sin embargo, como se ha mencionado antes la altura se ha estabilizado en tanto que

el rendimiento potencial ha aumentado. Dicho aumento ha sido acompañado en algunos casos con selección por tolerancia al vuelco, por lo que ciertas prácticas llevadas a cabo por los mejoradores en el campo de cría, como la flexión de plantas y la evaluación empírica de la dureza del tallo, han sido efectivas para la selección de cultivares de mejor comportamiento. La obtención de cultivares potencialmente susceptibles al vuelco se evitaría si se pudiera realizar una efectiva caracterización para descartar todo material con riesgo de vuelco. Para ello sería conveniente el estudio de las bases genéticas de los caracteres asociados a este fenómeno. El desarrollo o identificación de marcadores moleculares asociados a caracteres determinantes del vuelco sería el método más rápido y eficiente para seleccionar cultivares de mejor comportamiento en ausencia de condiciones predisponentes para su expresión. En este sentido, Berry y Berry (2015) en dos poblaciones de haploides duplicados, segregantes para la susceptibilidad al vuelco y caracteres asociados, encontraron amplia variabilidad genética para el diámetro de tallo, espesor de pared y resistencia material, y más de un QTL para cada uno de los caracteres, lo que sugiere un control poligénico de los mismos. La selección asistida por marcadores podría ser una alternativa para la obtención de resistencia al vuelco. Sin embargo, es necesario realizar estudios adicionales para mejorar el conocimiento de las bases genéticas de los mismos e identificar marcadores que sean efectivos a través de un amplio rango de fondos genéticos y ambientes. Por otra parte, ya se han identificado varios de los genes involucrados en el control la altura de la planta, y su efecto sobre el rendimiento ha sido probado, por lo que podría construirse un "haplotipo de altura deseada" de alto rendimiento con dicha información (Rebezke *et al.*, 2000; Ellis *et al.*, 2002; Griffiths *et al.*, 2009).

## 5. CONCLUSIONES

La hipótesis 1 propone que la susceptibilidad al vuelco de los cultivares de trigo pan actualmente difundidos en Argentina está asociada con alguno de los caracteres candidatos, mencionados en la bibliografía. Esta hipótesis no se rechazó, ya que la altura de planta y el diámetro del entrenudo basal presentaron una asociación significativa con la susceptibilidad al vuelco observada a campo.

La hipótesis 2, que postula que los caracteres propuestos están asociados entre sí, no se rechazó ya que se registraron múltiples asociaciones entre los caracteres medidos. Esta interdependencia debe considerarse al realizar el análisis de sensibilidad de los caracteres asociados al vuelco.

La hipótesis 3, que afirma que la susceptibilidad al vuelco se puede estimar con un modelo que incluye al menos una de las variables propuestas, no se rechazó, ya que el modelo obtenido en el presente estudio, con el que se logró el mejor ajuste, permitió obtener valores de susceptibilidad de un cultivar en particular, expresados como desvíos del promedio de los tratamientos comparados. El modelo obtenido permitiría estimar las diferencias de comportamiento de un conjunto de cultivares y establecer un ordenamiento de los mismos, incluso al realizar mediciones en un experimento que no haya registrado vuelco. Por otra parte, el modelo de Berry *et al.* (2003a) permitiría estimar el riesgo de ocurrencia de vuelco, si bien con mayor error que el modelo de la Ec. [12], al menos para el conjunto de datos presentado en esta tesis.

La hipótesis 4, que postula que diferentes prácticas de manejo afectan los caracteres asociados al vuelco, no se rechazó ya que las variables que fueron incluidas en los modelos propuestos para estimar la susceptibilidad al vuelco de diferentes cultivares fueron afectadas por cambios en las condiciones de cultivo. Sin embargo, dado que al estimar el  $\beta$  no se encontró interacción cultivar x manejo significativa, los modelos propuestos permitirían comparar la susceptibilidad de los cultivares sin gran influencia del manejo o el ambiente entre experimentos.

Los resultados obtenidos indican que es más adecuado reducir la susceptibilidad al vuelco por medio del mejoramiento genético que a través del manejo del cultivo. Sin embargo, también se deberían evaluar otras condiciones de cultivo como diferentes dosis de fertilización nitrogenada y la aplicación de reguladores de crecimiento. En el marco del mejoramiento genético, en primera instancia, se debería trabajar reduciendo la altura de la planta y el rendimiento/espiga, y aumentando el diámetro del tallo para obtener cultivares menos susceptibles a la ocurrencia de vuelco, sin reducir el espesor de la pared del tallo. Asimismo el número de espigas de estos genotipos debería ser alto para compensar la reducción en rendimiento por espiga. Además, se podría aumentar la resistencia del material constitutivo del tallo y buscar marcadores moleculares asociados a estas variables para realizar selección asistida.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ABBATE, P. E.; ANDRADE, F. H.; LÁZARO, L.; BARIFFI, J. H.; BERARDOCCO, H. G.; INZA, V. H.; MARTURANO, F. 1998a. Grain yield increase in recent Argentine wheat cultivars. *Crop Science*. 38: 1203–1209.
- ABBATE, P.E.; BARIFFI, J.H.; LÁZARO, L.; DE DIOS, M.A.; ETCHEGOYEN, F. 1998b. Efecto del cloromecuato sobre el rendimiento, la altura y el vuelco de trigo. 4° Congreso Nacional de Trigo. (Mar del Plata, Buenos Aires, 1998). Buenos Aires, Argentina. [en línea] <[http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/01/eea-balcarce-efectos-del-cloromecuato-\\_ccc\\_-en-trigo\\_3.pdf](http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/01/eea-balcarce-efectos-del-cloromecuato-_ccc_-en-trigo_3.pdf)> [consulta: 20 de agosto de 2013].
- ABBATE, P. E. 2007. Efecto de cloromecuato en trigo. Taller de Reguladores de Crecimiento y Biostimulantes en Cultivos Extensivos. Mar del Plata. Argentina. pp. 1-6.
- ABBATE, P.E.; Lorenzo, M.; Toledo, J.I.; Cabral, A. 2009. Red de evaluación de cultivares de trigo pan con alta tecnología (RET-AT): Resultados obtenidos en Balcarce durante la campaña 2008/09. INASE. [en línea] <http://www.inase.gov.ar/images/stories/RET/2008-2009/RET%202008%20Balcarce%20AT%20informe.pdf>; [consulta: 22-sep-2013].
- ABBATE, P.E.; LORENZO, M.; CABRAL, A.; TOLEDO, J.I. 2010. RET - Red de Ensayos Comparativos de Variedades de Trigo. Informe de Región IV, Balcarce Alta Tecnología (AT). INASE [en línea] <http://www.inase.gov.ar/images/stories/RET/2009-2010/inta%20balcarce%20a%20tec.xls>; [consulta: 22-sep-2013].
- ALLAN, R.E. 1986. Agronomic comparisons among wheat lines nearly isogenic for three reduced height genes. *Crop Science*. 26:707–710
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage. FAO, Rome. Paper 56. 300(9): D05109.
- ANNICCHIARICO, P. 2002. Genotype×Environment Interactions: Challenges and Opportunities for Plant Breeding and Cultivar Recommendations. Plant Production and Protection. Rome: FAO. Paper 174.
- BAKER, C.J. 1995. The development of a theoretical model for the windthrow of plants. *Journal of Theoretical Biology*. 175: 355-372.
- BAKER, C. J.; BERRY, P. M.; SPINK, J. H.; SYLVESTER-BRADLEY, R., GRIFFIN, J. M.; SCOTT, R.K.; CLARE, R. 1998. A method for the assessment of the risk of wheat lodging. *Journal of Theoretical Biology*. 194: 587–603.
- BEED, F.D.; PAVELEY, N.D.; SYLVESTER-BRADLEY, R. 2007. Predictability of wheat growth and yield in light-limited conditions. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 145, 63–79.
- BERRY, P.M.; GRIFIN, J.M; SYLVESTER-BRADLEY, R.; SCOTT, R.K.; SPINK, J.H.; BAKER, C.J.; CLARE, R. 2000. Controlling plant form through husbandry to minimise lodging in wheat. *Field Crops Research*. 67: 59–81.
- BERRY, P.M.; SPINK, J.H.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; PICKETT, A.; STERLING, M.; BAKER, C.J.; CAMERON, N. 2002. Lodging control through variety choice and management. Proceedings of the 8th Home-Grown Cereals Association R & D Conference on Cereals and Oilseeds. pp. 7.1- 7.12.

- BERRY, P.M.; STERLING, M.; BAKER, C.J.; SPINK, J.H.; SPARKES, D.L. 2003a. A calibrated model of wheat lodging compared with field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119:167–180.
- BERRY, P.M.; SPINK, J.H.; GAY, A.P.; CRAIGON, J. 2003b. A comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivars. *Journal of Agriculture Science*. 141: 191:202.
- BERRY, P.M.; STERLING, M.; SPINK, J.H.; BAKER, C.J.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; MOONEY, S. J.; ENNOS, A. R. 2004. Understanding and reducing lodging in cereals. *Advances in Agronomy*. 84: 217-271.
- BERRY, P.M.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; BERRY, S. 2007. Ideotype design for lodging-resistant wheat. *Euphytica*. 154: 165-179.
- BERRY, P.; PIÑERA, F.; RUTTERFORD, Z.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; REYNOLDS, M. 2012. Identifying traits and developing genetic sources for lodging resistance. *Proceedings of the 2nd International Workshop of the Wheat Yield Consortium*. CENEB, CIMMYT, Ciudad Obregon, México. pp. 30-32.
- BERRY, P.M.; SPINK, J. 2012. Predicting yield losses caused by lodging in wheat. *Field Crops Research*. 137: 19-26.
- BERRY, P.M.; KENDALL S.; RUTTERFORD Z.; ORFORD S.; GRIFFITHS S. 2014. Historical analysis of the effects of breeding on the height of winter wheat (*Triticum aestivum*) and consequences for lodging. *Euphytica*. DOI 10.1007/s10681-014-1286-y. pp 1-9
- BERRY, P.M.; BERRY, S.T. 2015. Understanding the genetic control of lodging-associated plant characters in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*. 1-19.
- CROOK, M.J.; ENNOS, A. R.; SELLERS, E.K. 1994. Structural development of the shoot and root systems of two winter wheat cultivars. *Journal of Experimental Botany*. 45: 857-863.
- CROOK, M. J.; ENNOS, A. R. 1995. The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany*. 46: 931-938.
- CRUZ, P. J.; CARVALHO, F. I. F. D.; CAETANO, V. D. R.; SILVA, S. A.; KUREK, A. J.; BARBIERI, R. L. 2001. Caracteres relacionados com a resistência ao acamamento em trigo comum. *Ciência Rural*. 31(4): 563-568.
- EASSON, D. L.; WHITE, E.M.; PICKLES, S. J. 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 121: 145–156.
- ELLIS, M.; SPIELMEYER, W.; GALE, K.; REBETZKE, G.; RICHARDS, R. 2002. "Perfect" markers for the Rht-B1b and Rht-D1b dwarfing genes in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 105(6-7): 1038-1042.
- FARQUHAR, T.; MEYER-PHILLIPS, H. 2001. Relative safety factors against global buckling, anchorage rotation, and tissue rupture in wheat. *Journal of Theoretical Biology*. 211(1): 55-65.
- FISCHER, R.A.; STAPPER, M. 1987. Lodging effects on High yielding crops of irrigated semidwarf wheat. *Field Crops Research*. 17: 245-228.

- FLINTHAM, J.E.; BORNER, A.; WORLAND, A.J.; GALE, M.D. 1997. Optimizing wheat grain yield: effects of Rht (gibberellin-insensitive) dwarfing genes. *Journal of Agricultural Science*. 128:11–25.
- FOX, J. 2005. The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software*. 14(9): 1-42.
- GRIFFITHS S, SIMMONDS J, LEVERINGTON M, WANG, Y.; FISH, L.; SAYERS, L.; SNAPE, J. 2009. Meta-QTL analysis of the genetic control of ear emergence in elite European winter wheat germplasm. *Theoretical and Applied Genetics* 119: 383–395.
- INASE. Red de evaluación de cultivares de trigo pan con alta tecnología (RET-AT). [en línea] <http://www.inase.gov.ar/> [consulta: 22-abril-2015].
- KELBERT, A.J.; SPANER, D.; BRIGGS, K.G.; KING, J.R. 2004a. The association of culm anatomy with lodging susceptibility in modern spring wheat genotypes. *Euphytica*. 136: 211–221.
- KELBERT, A.J.; SPANER, D.; BRIGGS, K.G.; KING, J.R. 2004b. Screening for lodging resistance in spring wheat breeding programmes. *Plant Breeding*. 123: 349-354.
- LOVELL, D.J.; PARKER, S.R.; PAVELEY, N.D.; WORLAND, A.J. 2002. Understanding field resistance mechanisms for improved control of *Septoria tritici*. *Plant Protection Science* 38: 165–169.
- LOYCE, C.; MEYNARD, J.M.; BOUCHARD, C.; ROLLAND, B.; LONNET, P.; BATAILLON, P.; BERNICOT, M.H.; BONNEFOY, M.; CHARRIER, X.; DEBOTE, B.; DEMARQUET, T.; DUPERRIER, B.; FÉLIX, I.; HEDDADJ, D.; LEBLANC, O.; LELEU, M.; MANGIN, P.; MÉAUSOONE, M.; DOUSSINAULT, G. 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection*. 27:1131-1142.
- MATROX Electronic Systems Ltd. 1997. MATROX INSPTR Software.
- MENDIBURU, F. 2008. *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research*. R package, versión: 1.1-2. [en línea] <<https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/index.html>> [consulta: 15 de septiembre de 2014].
- MIRABELLA, N.E. 2012. Identificación de atributos asociados con la tolerancia al vuelco en trigo pan para su utilización en el mejoramiento genético. Tesis Ingeniera agrónoma. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina. 32 p
- MIRALLES DJ, SLAFER GA. 1997. Radiation interception and radiation use efficiency of near isogenic wheat lines with different height. *Euphytica* 97, 201–208.
- NAVABI, A.; IQBAL, M.; STRENZKE, K.; SPANER, D. 2006. The relationship between lodging and plant height in a diverse wheat population. *Canadian Journal of Plant Science*. 86(3): 723-726.
- NIKLAS, K. J. 1992. *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago press. 609p
- PINTHUS, M. J. 1973. Lodging in wheat, barley, and oats: The phenomenon, its causes, and preventive measures. *Advances in Agronomy*. 25:210-256.



- PIÑERA-CHÁVEZ, F.J.; BERRY, P. M.; FOULKES, M. J.; REYNOLDS, M. P. 2015. Structural Requirements of Irrigated Spring Wheat to Avoid Lodging. Proceedings of the 5th International Workshop of the Wheat Yield Consortium. CENEB, CIMMYT, Ciudad Obregon, Sonora, Mexico, DF. CIMMYT, pp. 127–132.
- R CORE TEAM. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [en línea] <http://www.R-project.org/> [consulta: 15 de septiembre de 2014].
- RAJARAM, S., 1995, Wheat Germplasm Improvement: Historical Perspectives, Philosophy, Objectives, and Missions. En: Rajaram, S.; Hettel, G.P. (eds). Wheat Breeding at CIMMYT: Commemorating 50 Years of Research in Mexico for Global Wheat Improvement. México, D.F. CIMMYT. pp. 1-10.
- REBETZKE, G. J.; RICHARDS, R. A. 2000. Gibberellic acid-sensitive dwarfing genes reduce plant height to increase kernel number and grain yield of wheat. *Crop and Pasture Science*, 51(2), 235-246.
- REYNOLDS, M.; WARHAM, E.; VAUGHAN, S.; BRAUN, S. 2012. An international collaboration to raise the yield potential of wheat by 50% by 2030. Proceedings of the 2nd International Workshop of the Wheat Yield Consortium. CENEB, CIMMYT, Ciudad Obregon, México. pp. vi-viii.
- STAPPER, M.; FISCHER, R.A. 1990. Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in Southern New South Wales. II. Growth, yield and nitrogen use. *Australian Journal of Agricultural Research*. 41: 1021-1041.
- STERLING, M.; BAKER, C.J.; BERRY, P.M.; WADE, A. 2003. An experimental investigation of the lodging of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119: 149–165.
- SUN, X.; YA G, Z. 00 8. Generalized Mc emar' s test for homogeneity of the marginal distributions. In The SAS Global Forum 2008 Conference (Eds SAS Users Group International). Cary, NC: SAS Institute Inc. Paper 382. pp. 1–10.
- TRIPATHI, S.C.; SAYRE, K.D.; KAUL, J.N.; NARANG, R.S. 2003. Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging: effects of genotypes, N levels and ethephon. *Field Crops Research*. 84: 271-290.
- WORLAND, T.; SNAPE, J. W. 2001. Genetic basis of worldwide wheat varietal improvement. *The World Wheat Book: A history of wheat breeding*. Paris, Lavoisier Publishing. pp. 61-67.
- ZUBER, U.; WINZELER, H.; MESSMER, M. M.; KELLER, M.; KELLER, B.; SCHMID, J. E.; STAMP, P. 1999. Morphological traits associated with lodging resistance of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 182(1): 17-24.