

# GENETIC BEHAVIOR OF DIFFERENT WHEAT GENOTYPES AGAINST *Fusarium graminearum*

## COMPORTAMIENTO GENÉTICO DE DIVERSOS GENOTIPOS DE TRIGO FRENTE A *Fusarium graminearum*

E. Javier Alberione<sup>1</sup>, L. Maximiliano Ortega<sup>2</sup>, Nicolás Salines<sup>1</sup>, A. Luciana Astoreca<sup>2</sup>, T. María Alconada<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Patología Vegetal del Cultivo de Trigo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Ruta 12, km 3. (2580) Marco Juárez, Córdoba, Argentina. <sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Fermentaciones Industriales (CINDEFI), UNLP; CCT-La Plata, CONICET. Facultad de Ciencias Exactas. Calle 47 y 115 (B1900ASH) Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

### ABSTRACT

*Fusarium graminearum* is the principal Fusarium head blight (FHB) causal agent in Argentine wheat, diminishes yields, reduces grain quality and end-use, and liberates mycotoxins. The aim of this study was to identify new sources of resistance to FHB in Argentine wheat cultivars and lines for comparison with known resistant international cultivars. We evaluated the *Triticum aestivum* behavior against *F. graminearum* indicative of resistance to wheat-spike penetration by FHB (type-I resistance). The assays were performed under field conditions in Marcos Juárez (62° 6' 7" W, 32° 41' 39" S; 116 masl), Córdoba province, Argentina, during spring 2010, with moisture controlled by a microsprinkler system. For this study we distributed 210 wheat varieties with spikes inoculated by hand-spraying on a hill plot, as the experimental unit, and they were planted and inoculated in duplicate. The experimental design was randomized complete blocks and results were analyzed by ANOVA and the Fisher-LSD test ( $p \leq 0.05$ ) for comparing the mean values of incidence and severity among treatments. Resistance was evaluated through pathometric criteria and yields. The *F. graminearum* isolate's high infectivity enabled disease evaluation for all wheat varieties. All variables, except incidence, were statistically different among the Argentine wheat cultivars, whereas only the thousand-grain weight differed significantly in the international cultivars. Of the 92 advanced wheat-line genotypes of three different growth cycles, 57 % were moderately resistant and 40 % moderately susceptible to infection. FHB resistance evaluated in all cultivars and domestic- and international-genotype lines identified varieties of five different disease-resistance levels. Knowledge of the genetic behavior can contribute to new

### RESUMEN

*Fusarium graminearum* es el principal agente causal de fusariosis de la espiga (FET) de trigo en Argentina, disminuye el rendimiento, reduce la calidad del grano y su uso final, y libera micotoxinas. El objetivo de este estudio fue identificar nuevas fuentes de resistencia a FET en cultivares y líneas de trigo argentinos al comparar con cultivares resistentes internacionales conocidos. El comportamiento de *Triticum aestivum* se evaluó frente a *F. graminearum* como indicador de resistencia a la penetración de FET a la espiga de trigo (resistencia de tipo I) en. Los ensayos se realizaron en condiciones de campo en Marcos Juárez (62° 6' 7" O, 32° 41' 39" S; 116 msnm), provincia de Córdoba, Argentina, durante la primavera de 2010, con la humedad controlada por un sistema de microaspersión. Para este estudio distribuimos 210 variedades de trigo con espigas inoculadas por pulverización a mano sobre una parcela colina, que fue la unidad experimental; las variedades de trigo se plantaron e inocularon por duplicado. El diseño experimental fue de bloques completos aleatorios y los resultados fueron analizados por ANOVA y el test de Fisher-LSD ( $p \leq 0.05$ ) para comparar los valores medios de incidencia y severidad entre los tratamientos. La resistencia se evaluó a través de criterios patométricos y de rendimiento. La alta infectividad del aislamiento de *F. graminearum* permitió evaluar la enfermedad en todas las variedades de trigo. Todas las variables, excepto la incidencia, fueron estadísticamente diferentes entre los cultivares de trigo de Argentina, mientras que sólo el peso de mil granos difirió significativamente en los cultivares internacionales. De los 92 genotipos de trigo de línea avanzada de tres diferentes ciclos de crecimiento, 57 % fueron moderadamente resistentes y 40 % moderadamente susceptibles a infecciones. La resistencia a FET evaluada en todos los cultivares y líneas de genotipos nacionales e internacionales permitió identificar variedades de cinco niveles de resistencia a enfermedades. El conocimiento del comportamiento genético puede contribuir

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2015. Aprobado: noviembre, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 335-346. 2016.

**crosses to generate varieties with improved resistance against FHB.**

**Key words:** Fusarium head blight, *Fusarium graminearum*, pathogenicity, resistance, *Triticum aestivum*, domestic and international wheat genotypes

## INTRODUCTION

**F**usarium head blight (FHB), or fusariosis, on small-grain cereals is a devastating disease throughout the world, decreasing the quality, weight, and carbohydrate and protein content of grain; thus compromising the yield and quality of grain production and the health of consumers through the production of associated mycotoxins (Bai *et al.*, 2001). The use of infected grains can furthermore modify bread production because the metabolites produced by the fungus inhibit the growth and enzymatic activity of yeast (Saric *et al.*, 1997). The main etiologic agents of FHB are *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *Microdochium nivale*, and *M. majus*. The distribution and prevalence of these pathogens are largely determined by climatic conditions such as temperature and humidity. In Argentina, the dominant fungal agent associated with FHB is *F. graminearum* (Schwabe), anamorph of *Gibberella zeae* (Schw.) Petch (Galich, 1997; Gilbert and Tekauz, 2000; Lori *et al.*, 2003; Kikot *et al.*, 2011). FHB epidemics in Argentina were reported in 1976, 1978, 1985, 1993, 2001, and 2012 (Moschini and Fortugno, 1996; Kikot *et al.*, 2011). *Fusarium graminearum* produces mycotoxins, such as the trichothecenes deoxynivalenol, its derivatives 3-acetyldeoxynivalenol and 15-acetyldeoxynivalenol, and nivalenol. The role of trichothecenes in plant disease is not clear, but Proctor *et al.* (1995), Gang *et al.* (1998), Šíp *et al.*, (2011), and Malbrán *et al.* (2012) reported a positive correlation between aggressiveness and deoxynivalenol production by *F. culmorum* and *F. graminearum*.

Degrees of aggressiveness could result from qualitative and quantitative differences in the production of mycotoxins and the enzymes that degrade the plant cell wall (ten Have *et al.*, 2002; Jenczmionka *et al.*, 2003; Jenczmionka and Schafer, 2005). But trichothecenes *per se* are related to the

**al desarrollo de nuevos cruzamientos para generar variedades de trigo con resistencia mejorada contra FET.**

**Palabras clave:** Fusariosis de la espiga de trigo, *Fusarium graminearum*, patogenicidad, resistencia, *Triticum aestivum*, genotipos de trigo nacionales e internacionales.

## INTRODUCCIÓN

**L**a fusariosis de la espiga de trigo (FET) en cereales de grano pequeño es una enfermedad devastadora en el mundo, que disminuye la calidad, el peso y los hidratos de carbono y proteínas de los cereales; comprometiendo así el rendimiento y la calidad de la producción de granos y la salud de los consumidores a través de la producción de micotoxinas asociadas (Bai *et al.*, 2001). El uso de granos infectados puede modificar, además, la producción de pan porque los metabolitos producidos por el hongo inhiben el crecimiento y la actividad enzimática de la levadura (Saric *et al.*, 1997). Los principales agentes etiológicos de FET son *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *Microdochium nivale*, y *M. majus*. La distribución y prevalencia de estos patógenos están determinadas en gran medida por las condiciones climáticas, tales como la temperatura y la humedad. En Argentina, el agente fúngico dominante asociado a la FET es *F. graminearum* (Schwabe), anamorfo de *Gibberella zeae* (Schw.) Petch (Galich, 1997; Gilbert y Tekauz, 2000; Lori *et al.*, 2003; Kikot *et al.*, 2011). Las epidemias de FET en Argentina se registraron en 1976, 1978, 1985, 1993, 2001, y 2012 (Moschini y Fortugno, 1996; Kikot *et al.*, 2011). *Fusarium graminearum* produce micotoxinas, como los tricotecenos deoxinivalenol y sus derivados, 3-acetildeoxinivalenol y 15-acetildeoxinivalenol, y nivalenol. La función de los tricotecenos en las enfermedades de las plantas no está claro, pero Proctor *et al.* (1995), Gang *et al.* (1998), Šíp *et al.*, (2011), y Malbrán *et al.* (2012) reportaron una correlación positiva entre la agresividad y la producción de deoxinivalenol por *F. culmorum* y *F. graminearum*.

El grado de agresividad podría resultar de diferencias cualitativas y cuantitativas en la producción de micotoxinas y enzimas que degradan la pared celular de la planta (Ten Have *et al.*, 2002; Jenczmionka *et al.*, 2003; Jenczmionka y Schafer, 2005). Pero los tricotecenos están más relacionados con la propagación de la enfermedad en la planta que con su

spread of the disease throughout the plant, rather than the establishment of FHB (Goswami and Kistler, 2005; Nicholson *et al.*, 2007).

The relevance of the selection of genotypes resistant to FHB in wheat is based on the rationale that host resistance is considered the most appropriate means of controlling the disease. Several types of genetic resistances to FHB in wheat are described; for example, type I is associated with resistance to initial infection and type II with resistance to the spread of infection within the plant; both were described by Schroeder and Christensen in 1963 (Mesterházy *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 2007). To distinguish between these sources of resistance, researchers developed inoculation methods to test genotypes in breeding programs. Whereas spraying wheat heads with conidial suspensions allows the evaluation of type-I resistance, the inoculation of a single floret per head with conidia (*i.e.*, a point inoculation) enables a monitoring of the spread of the disease among the spikes and, therefore, an assessment of type-II resistance (Bai and Shaner, 1994; Bai *et al.*, 2001).

The objective of this study was to identify new sources of resistance to FHB in Argentine wheat cultivars and lines for comparison with known resistant international cultivars. The hypothesis was that the characterization of resistance to FHB in local lines and cultivars and in international germplasm would provide relevant information regarding differences in genotypic performance against the disease.

## MATERIALS AND METHODS

### Fungal inoculum

The *F. graminearum* isolate used for inoculum production was obtained from infected wheat spikes in Marcos Juárez (62° 6' 7" W, 32° 41' 39" S; 116 masl), Córdoba province, Argentina through the methodology used by Kikot *et al.* (2011). The monosporic isolate was stored in tubes with 2 % (w/v) synthetic-nutrient agar under a layer of mineral oil at 4 °C (Leslie and Summerell, 2006).

### Inoculum production

From cultures of *F. graminearum* grown on synthetic-nutrient agar, pieces of 0.5 x 0.5 cm were cut and inoculated into 50 mL of bran-agar medium (40 g of bran, 20 g agar, 1,000 mL of water; boiled for 1 h) in 250-mL Erlenmeyer flasks. Cultures

establecimiento (Goswami y Kistler, 2005; Nicholson *et al.*, 2007).

La relevancia de la selección de genotipos resistentes a la FET en el trigo se basa en que la resistencia del huésped es considerada el medio más adecuado para controlar la enfermedad. Varios tipos de resistencias genéticas a la FET se describieron en el trigo; por ejemplo, el tipo I se asoció con la resistencia a la infección inicial y el tipo II con la resistencia a la propagación de la infección dentro de la planta; ambos fueron descritos por Schroeder y Christensen en 1963 (Mesterházy *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 2007). Para distinguir entre estas fuentes de resistencia, los investigadores desarrollaron métodos de inoculación para evaluar los genotipos en los programas de mejoramiento. La pulverización de las espigas de trigo con suspensiones de conidios permitió evaluar la resistencia del tipo I; pero la inoculación de una sola inyección por espiga con conidios (una inoculación puntual) permite un seguimiento de la propagación de la enfermedad entre las espigas y, por lo tanto, una evaluación de la resistencia del tipo-II (Bai y Shaner, 1994; Bai *et al.*, 2001).

El objetivo de este estudio fue identificar fuentes nuevas de resistencia a la FET en cultivares y líneas de trigo argentinos en relación con cultivares resistentes internacionales conocidos. La hipótesis fue que la caracterización de la resistencia a la FET en líneas y cultivares locales, y en el germoplasma internacional proporcionaría información relevante respecto a las diferencias en el comportamiento genotípico contra la enfermedad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Inóculo fúngico

El aislamiento de *F. graminearum* usando para la producción del inóculo se obtuvo de espigas de trigo infectadas en Marcos Juárez (62° 6' 7" O, 32° 41' 39" S; 116 msnm), provincia de Córdoba, Argentina, a través de la metodología usada por Kikot *et al.* (2011). El aislamiento monospórico se conservó en tubos con 2 % (w/v) de agar sintético nutritivo bajo una capa de aceite mineral a 4 °C (Leslie y Summerell, 2006).

### Producción del inóculo

En cultivos de *F. graminearum* cultivados en agar sintético nutritivo, se cortaron piezas de 0.5 x 0.5 cm se inocularon en 50 mL de un medio de agar de afrecho de trigo (40 g afrecho de

were kept 2 d at 22 °C and then for 10 d at room temperature (25 °C) under fluorescent lighting. Conidia were extracted from each flask with sterile distilled water, washed with Tween 20 (1 drop 100 mL<sup>-1</sup> water), and filtered through sterile gauze (methodology used by the Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Marcos Juárez, INTA). A suspension containing 3 x 10<sup>5</sup> conidia mL<sup>-1</sup> was used to inoculate wheat spikes (Galich, 1997).

#### Wheat varieties

The wheat genotypes examined were 215: 76 Argentine cultivars, 42 international cultivars belonging to the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT; Scab Resistance Screening Nursery), 92 advanced wheat lines of different growth cycles obtained from the INTA breeding program, and five control cultivars. The control genotypes were: the resistant Sumai 3 and YMI 6-26B, the moderately resistant ProINTA Granar and ProINTA Oasis, and the susceptible Buck Halcón.

#### Pathogenicity test

The experiment was performed during the Spring 2010 in Marcos Juárez under conditions similar to those in the field, but with partial control of humidity facilitated by microsprinkler equipment operating automatically through a timer (Green Mist, NaanDanJain) to provide watering for 5 min every 25 min. The wheat plants were covered with a cloth to prevent damage by birds. The seedbed fertilized (50 kg urea ha<sup>-1</sup>) and treated with chlorpyrifos insecticide (500 mL ha<sup>-1</sup>), was prepared with motorized cultivators. The weeding was either mechanical or by hand.

The plants involving the domestic and international wheat cultivars along with the advanced wheat lines were sown in duplicate. The experimental design was randomized complete blocks and the experimental units were hill plots (Frey, 1965). Sowing was carried out in midwinter (July 30, 2010) at 5 to 10 seeds per furrow in a staggered arrangement. Wheat heads were inoculated with the *Fusarium* by means of a hand sprayer when at least 5 spikes were in the anthesis stage (determined by the presence of exposed anthers). The wheat spikes of each cultivar or line were inoculated twice within four days in order to insure infectivity. Each experiment had a set of five control cultivars: two resistant, two moderately resistant, and one susceptible. All the spikes for each variety or line from each of the three wheat-genotype sources sown in duplicate, were cut and stored in envelopes for subsequent observation and assessment of the degree of infection. Resistance was evaluated through pathometrics and yield variables (Galich, 1997).

trigo, 20 g agar, 1000 mL agua; hervida durante 1 h) en frascos Erlenmeyer de 250 mL. Los cultivos se mantuvieron 2 d a 22 °C y después 10 d a temperatura ambiente (25 °C) con iluminación fluorescente. Los conidios se extrajeron de cada frasco con agua destilada esterilizada, se lavaron con Tween 20 (1 gota 100 mL<sup>-1</sup> agua), y se filtraron a través de una gasa estéril (metodología usada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Marcos Juárez, INTA). Una suspensión con 3 x 10<sup>5</sup> de conidios mL<sup>-1</sup> se usó para inocular espigas de trigo (Galich, 1997).

#### Variedades de trigo

Los genotipos de trigo fueron 215: 76 cultivares argentinos, 42 cultivares internacionales pertenecientes al Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT; Scab Resistance Screening Nursery), 92 líneas de trigo avanzadas de diferentes ciclos de crecimiento obtenidas del programa de cultivo del INTA y cinco cultivares testigo. Los genotipos testigo fueron: los resistentes Sumai 3 y YMI 6-26B, los moderadamente resistentes ProINTA Granar y ProINTA Oasis, y el susceptible Buck Halcón.

#### Prueba de patogenicidad

El experimento se realizó durante la primavera de 2010 en Marcos Juárez en condiciones similares a las del campo, pero con control parcial de la humedad facilitado por un equipo de microaspersión que opera automáticamente a través de un temporizador (Green Mist, NaanDanJain) para proporcionar riego por 5 min cada 25 min. Las plantas de trigo estaban cubiertas con una mediasombra para evitar daños causados por aves. La cama de siembra fertilizada (50 kg de urea ha<sup>-1</sup>) y tratada con insecticida de clorpirifos (500 mL ha<sup>-1</sup>), se preparó con motocultivadores. El desmalezado se hizo con máquina o a mano.

Las plantas, que incluyen los cultivares de trigo nacionales e internacionales junto con las líneas de trigo avanzadas, se sembraron por duplicado. El diseño experimental fue de bloques completos aleatorios y las unidades experimentales fueron parcelas colina (Frey, 1965). La siembra se realizó en invierno (30 de julio del 2010), colocando 5 a 10 semillas por surco en una disposición escalonada. Las espigas de trigo se inocularon con *Fusarium* usando un pulverizador de mano cuando al menos 5 espigas estaban en la etapa de la anthesis (determinada por la presencia de anteras expuestas). Las espigas de trigo de cada cultivar o línea se inocularon dos veces en cuatro días para asegurar la infección. Cada experimento tuvo cinco cultivares testigo: dos resistentes, dos moderadamente resistentes, y uno susceptible. Todas las espigas para cada variedad o línea de cada una de las tres fuentes de genotipo de trigo sembradas por duplicado,

### Evaluation and determination

The variables evaluated were: 1) incidence, as the percentage of diseased spikes among a total of 20 spikes screened; 2) severity, as the percentage of diseased spikelets per spike among a total of six diseased spikes examined; 3) damaged kernels, as the percentage of damaged kernels per spike among a total of six diseased spikes inspected; 4) thousand-grain weight (TGW), determined by counting and weighing all the grains of the evaluated group then normalizing the value obtained to weight per 1000 grains; 5) the ISK index (*i. e.*, incidence, severity, and kernel damage) calculated as:  $(\% \text{ incidence} \times 0.3) + (\% \text{ de severity} \times 0.3) + (\text{kernel damage} \times 0.4)$ , according to Gilbert and Woods (2007).

### Severity ranges

The following severity ranges were used according to the Japanese and Brazilian scale based on spike severity (Kohli, 1989): 0, immune; 1, resistant (1-5 % severity); 2, moderately resistant (5-25 % severity); 3, moderately susceptible (25-50 % severity), 4, susceptible (50-75 % severity); 5, very susceptible (>75 % severity).

### Statistical analysis

The variables incidence, severity, percentage of diseased grains, and 1000-grain weight were analyzed by ANOVA and the Fisher-LSD test ( $p \leq 0.05$ ). Pearson correlation analysis between the variables was also performed and a frequency-histogram graph for the severity variable developed. In the national and international cultivars, all the variables were evaluated by ANOVA using InfoStat, 2008. On the advanced lines of wheat, the Fusarium index was calculated from the estimated incidence and severity variables ( $\text{percent incidence} \times \text{percent severity}/100$ ).

## RESULTS AND DISCUSSION

The pathogenicity on the Argentine cultivars showed statistically significant differences in all the variables analyzed, except for incidence, whereas in the international cultivars significant differences were observed only for TGW (Table 1). Cowger *et al.* (2009) found significant differences for variables incidence, severity, percentage of damaged kernels, and deoxynivalenol content among winter-wheat cultivars.

For the Argentine cultivars, the Pearson correlations were positive for the associations

se cortaron y se almacenaron en sobres para su posterior observación y evaluación del grado de infección. La resistencia se evaluó utilizando las variables patométricas y de rendimiento (Galich, 1997).

### Evaluación y determinación

Las variables evaluadas fueron: 1) incidencia, como el porcentaje de espigas enfermas entre un total de 20 espigas seleccionadas; 2) severidad, como el porcentaje de espiguillas enfermas por espiga entre un total de seis espigas enfermas examinadas; 3) granos dañados, como el porcentaje de granos dañados por espiga entre un total de seis espigas enfermas inspeccionadas; 4) el peso de mil granos (TGW) se determinó contando y pesando todos los granos del grupo evaluado, luego normalizando el valor obtenido para el peso por cada 1000 granos; 5) el índice ISK (es decir, la incidencia, la severidad y los granos dañados) calculado como:  $(\% \text{ de incidencia} \times 0.3) + (\% \text{ de severidad} \times 0.3) + (\% \text{ de granos dañados} \times 0.4)$ , de acuerdo con Gilbert y Woods (2007).

### Intervalos de severidad

Los siguientes intervalos de severidad se usaron de acuerdo a la escala japonesa y brasileña basadas en la severidad de las espigas (Kohli, 1989): 0, inmune; 1, resistente (1-5 % de severidad); 2, moderadamente resistente (5-25 % de severidad); 3, moderadamente susceptible (25-50 % de severidad), 4, susceptible (50-75 % de severidad); 5, muy susceptible (>75% de severidad).

### Análisis estadístico

Las variables incidencia, severidad, porcentaje de granos enfermos, y peso de 1000 granos se analizaron con ANDEVA y el test de Fisher-LSD ( $p \leq 0.05$ ). También se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables y un gráfico de histograma de frecuencia para la variable de severidad desarrollada. En los cultivares nacionales e internacionales se evaluaron todas las variables mediante ANDEVA con InfoStat 2008. En las líneas avanzadas de trigo, el índice de Fusarium se calculó de las variables de incidencia y severidad estimadas ( $\text{porcentaje de incidencia} \times \text{porcentaje de severidad}/100$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La patogenicidad en los cultivares argentinos mostró diferencias estadísticas significativas en todas las variables analizadas, excepto la incidencia, mientras que en los cultivares internacionales sólo se observaron

**Table 1. Statistical analysis of the pathogenicity tests on Argentine and international cultivars infected with *Fusarium graminearum* isolate.**

**Cuadro 1. Análisis estadístico de las pruebas de patogenicidad en cultivares argentinos e internacionales infectados con *Fusarium graminearum*.**

Cultivars	Severity (%)			Damaged kernel (%)			TGW (g)		
	p ≤	Range		p ≤	Range		p ≤	Range	
		Highest	Lowest		Highest	Lowest		Highest	Lowest
Argentine	0.001	61.90	10.21	0.001	91.70	4.56	0.001	22.33	5.15
International	0.634	34.69	5.75	0.228	40.58	3.85	0.031	31.78	6.91
Sumai 3*		12.50			10.20			20.20	
YMI 6-26B*		17.20			12.30			19.20	
Pro INTA Granar*		20.00			33.20			14.50	
Buck Halcón*		23.30			24.20			15.40	
Pro INTA Oasis*		19.60			26.70			14.60	

TGW: thousand-grain weight. \*Controls ♦ TGW: peso de mil granos. \*Testigos.

between incidence and severity ( $p \leq 0.01$ ), incidence and the percentage of damaged kernels ( $p \leq 0.01$ ), severity and the percentage of damaged kernels ( $p \leq 0.01$ ) severity and TGW ( $p = 0.01$ ), and the percentage of damaged kernels and TGW ( $p \leq 0.01$ ). But the correlation was negative between percentage of damaged kernels and TGW, and between the ISK index and TGW. In a similar study, Hernández (2010) also observed a positive correlation between severity and the percentage of damaged kernels.

The symptoms showed a high association with the level of infection in the grains. Besides, the TGW was reduced due to an increment in incidence, severity, and the ISK index, in accordance with the increase in infected grains. In Table 2 it is shown that the grain weight was more affected in cultivars with higher susceptibility to the disease.

The values above the diagonal of identity-redundant correlations, demarcated by dashes,

diferencias significativas en TGW (Cuadro 1). Cowger *et al.* (2009) encontraron diferencias significativas en las variables de incidencia, severidad, porcentaje de granos dañados, y el contenido de deoxinivalenol entre cultivares de trigo de invierno.

En los cultivares argentinos, las correlaciones de Pearson fueron positivas para las asociaciones entre la incidencia y la severidad ( $p \leq 0.01$ ), la incidencia y el porcentaje de granos dañados ( $p \leq 0.01$ ), la severidad y el porcentaje de granos dañados ( $p \leq 0.01$ ), la severidad y TGW ( $p = 0.01$ ), y el porcentaje de granos dañados y TGW ( $p \leq 0.01$ ). Pero la correlación fue negativa entre el porcentaje de granos dañados y TGW, y entre el índice de ISK y TGW. En un estudio similar, Hernández (2010) observó una correlación positiva entre la severidad y el porcentaje de granos dañados.

Los síntomas mostraron asociación alta con el nivel de infección en los granos. Además, el TGW se

**Table 2. Correlation among the variables analyzed in Argentine cultivars infected with *Fusarium graminearum*.**

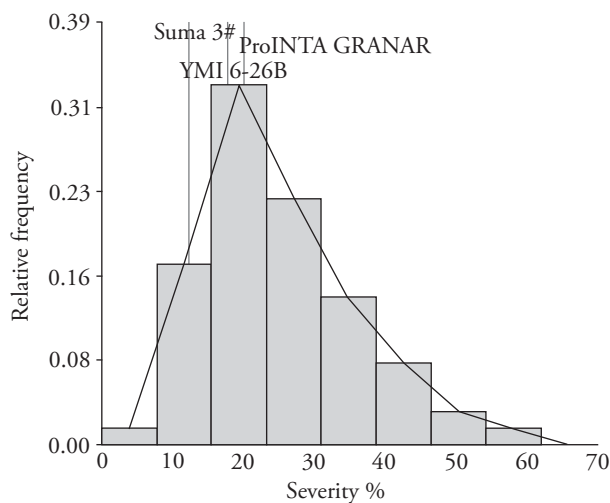
**Cuadro 2. Correlación entre las variables analizadas en cultivares argentinos infectados con *Fusarium graminearum*.**

Variable	Incidence (%)	Severity (%)	Damaged kernel (%)	TGW	ISK Index
Incidence (%)	—	0.00	$3.5 \times 10^{-12}$	0.46	0.00
Severity (%)	0.69	—	0.00	0.01	0.00
Damaged kernel (%)	0.56	0.80	—	$2.3 \times 10^{-6}$	0.00
TGW	-0.07	-0.21	-0.40	—	$3.5 \times 10^{-3}$
ISK Index	0.87	0.90	0.88	-0.25	—

TGW: thousand-grain weight. ISK index: incidence, severity, and damaged kernel. x TGW: peso de mil granos. Índice ISK: incidencia, severidad y granos dañados.

express the Pearson correlation among variables, whereas the values below that diagonal indicate the significance ( $p \leq 0.05$ ).

From the severity values obtained in the Argentine cultivars, a frequency histogram of FHB was constructed (Figure 1). Response to the disease of 21 cultivars (Cronox, LE 2357, Klein Proteo, Buck Huanchen, BioINTA 2005, Buck Puelche, Klein Castor, Buck AGP FAST, Arex, Klein Nutria, BioINTA 1005, Klein Carpincho, Klein Rayo, Buck Chacarero, Klein Zorro, Atlax, Buck 75 Aniversario, Buck Meteoro, BioINTA 1002, Klein Tigre, ACA



**Figure 1.** Frequency histogram of the Argentine cultivars infected with *Fusarium graminearum*. The bars illustrate the degree of severity as a percent on the abscissa versus the relative frequency of the cultivars that belonged to the corresponding degree of severity plotted as a fraction on the ordinate. The respective severity-versus-frequency values of the control cultivars Sumai 3, YMI 6-26B, and ProINTA Granar, shown above the bars, is indicated by vertical lines demarcating their position within the scheme.

**Figura 1.** Histograma de frecuencias de los cultivares argentinos infectados con *Fusarium graminearum*. Las barras ilustran el grado de severidad como un porcentaje en el eje de abscisas frente a la frecuencia relativa de los cultivares que pertenecían al correspondiente grado de severidad trazado como una fracción en la ordenada. Los respectivos valores de severidad versus frecuencia de los cultivares de control Sumai 3, YMI 6-26B y ProINTA Granar, que se muestran por encima de las barras, se indican mediante líneas verticales que delimitan su posición dentro del esquema.

redujo debido a un incremento en la incidencia, la severidad y el índice ISK, de acuerdo con el aumento en los granos infectados. En el Cuadro 2 se muestra que el peso del grano fue más afectado en los cultivares con mayor susceptibilidad a la enfermedad.

Los valores sobre la diagonal de correlaciones redundantes en identidad, demarcadas por guiones, expresan la correlación de Pearson entre las variables, mientras que los valores debajo de la diagonal indican la significancia ( $p \leq 0.05$ ).

Con los valores de severidad obtenidos en los cultivares argentinos, se construyó un histograma de frecuencias de FET (Figura 1). La respuesta a la enfermedad de 21 cultivares (Cronox, LE 2357, Klein Proteo, Buck Huanchen, BioINTA 2005, Buck Puelche, Klein Castor, Buck AGP rápido, Arex, Klein Nutria, BioINTA 1005, Klein Carpincho, Klein Rayo, Buck Chacarero, Klein Zorro, Atlax, Buck 75 Aniversario, Buck Meteoro, BioINTA 1002, Klein Tigre, ACA 906, y Buck 55 CL) no fue diferente ( $p > 0.05$ ) a los testigos resistentes Sumai 3 y YMI 6-26B y mostró niveles de severidad inferiores a 20 %. Pero Baguette P 11 y Baguette 18 fueron susceptibles, ya que mostraron un grado de severidad mayor al 50 %. Mergoum *et al.* (2007) caracterizaron el comportamiento de diferentes cultivares ante FET en Dakota del Norte en condiciones de infección natural y artificial durante diversos años y observaron diferencias significativas entre los cultivares.

En el Cuadro 3 están los valores de incidencia, severidad y granos dañados de los cultivares argentinos susceptibles, con niveles de severidad inferiores a 15 %. Los 11 cultivares incluidos en este grupo y el testigo Sumai 3 registraron valores más bajos para todas las variables analizadas, en comparación con los promedios observados ya sea en los cultivares susceptibles o en los internacionales; estos últimos se evaluaron previamente como susceptibles. Los cultivares susceptibles argentinos son los cinco, que mostraron el nivel mayor de severidad de la enfermedad: Baguette P 11 (61.9 %), Baguette 18 (53.6 %), Buck Mangrullo (48.5 %), Klein Guerrero (44.1 %), y BioINTA 3000 (42.5 %). Los cultivares argentinos con mayor resistencia a las enfermedades (Cuadro 3) tenían niveles medios de las tres variables analizadas que fueron inferiores a los promedios de los cultivares nacionales e internacionales.

La caracterización y evaluación de las variedades de trigo internacionales preseleccionadas para la resistencia a FET se realizó para verificar

906, and Buck 55 CL) was not different ( $p > 0.05$ ) to that of the resistant controls Sumai 3 and YMI 6-26B, and showed severity levels lower than 20 %. Baguette P 11 and Baguette 18, however, were susceptible since they showed a degree of severity above 50 %. Mergoum *et al.* (2007) characterized the behavior of different cultivars against FHB in North Dakota under conditions of natural and artificial infection throughout different years and observed significant differences among the cultivars.

Table 3 lists the values of incidence, severity, and damaged kernels of the Argentine susceptible cultivars with severity levels lower than 15 %. The 11 cultivars included in this group and the Sumai 3 control had lower values for all the variables analyzed, as compared to the averages observed in either the susceptible or the international cultivars, the latter were previously assessed as susceptible. The Argentine susceptible cultivars are the following five that showed the highest disease severity: Baguette P 11 (61.9 %), Baguette 18 (53.6 %), Buck Mangrullo (48.5 %), Klein Guerrero (44.1 %), and BioINTA 3000 (42.5 %). The Argentine cultivars with greater resistance to disease (Table 3) had mean levels for the three variables analyzed that were lower than the averages for domestic and international cultivars.

The characterization and evaluation of the international wheat cultivars preselected for FHB resistance, was carried out in order to verify the response to the disease under Argentine climatic conditions and with a local strain of the pathogen. The evaluation of the specimens considered resistant to the disease, according to information provided from the place of shipment, was confirmed since no significant differences were observed among the cultivars.

A study of the advanced wheat lines having different growth cycles obtained from the INTA breeding program was also useful in the search for genotypes resistant to FHB. Disease progression was registered according to the Fusarium index integrating the values of incidence, severity, and the combination of the two, expressed as  $(\text{incidence} \times \text{severity})/100$  (Hernandez, 2010), and the lines with low values of the Fusarium index were considered resistant. The highest level of Fusarium index values were for the long-growth-cycle lines and the lowest level for the short-growth-cycle lines, whereas the values for the lines of intermediate growth fell somewhere in between. Despite certain degree of overlap between

**Table 3. Argentine cultivars with higher resistance to FHB compared to the average values of susceptible Argentine and international cultivars.**

**Cuadro 3. Cultivares argentinos con mayor resistencia a la FET en comparación con los valores promedios de los cultivares argentinos e internacionales susceptibles.**

Resistant cultivars	Severity (%)	Incidence (%)	Damaged kernels (%)
Cronox	14.6	27.5	17.9
LE 2357	14.4	40.0	21.6
K. Proteo	14.1	22.5	15.4
B. Huanchen	12.7	15.0	12.6
BioINTA 2005	12.4	25.9	25.9
Sumai 3 (control)	12.3	30.0	16.7
B. Puelche	11.9	20.1	20.1
K. Castor	11.5	25.0	14.4
B. AGP Fast	11.2	32.5	14.9
Arex	10.2	15.0	12.2
K. Nutria	0.0	0.0	0.0
ARC average values <sup>†</sup>	11.7	24.7	16.1
ASC average values <sup>‡</sup>	50.1 <sup>1</sup>	74.2 <sup>2</sup>	60.2 <sup>3</sup>
IC average values <sup>§</sup>	17.2	34.7	18.3

ARC: Argentine resistant cultivars; ASC: Argentine susceptible cultivars; IC: international cultivars. <sup>†</sup>ProINTA Granar and Klein Don Enrique. <sup>‡</sup>Baguette P 11, Baguette 18, Buck Mangrullo, Klein Guerrero, and BioINTA 3,000. <sup>§</sup>Nobeoka Bouzu Komugi, Catbird, and Frontana. <sup>1</sup>Average value group of five cultivars with high severities (42.4 % to 61.9 %). <sup>2</sup>Average value group of five cultivars with high incidence values (71.3 % to 96.6 %). <sup>3</sup>Average value group of five cultivars with high numbers of damaged kernels (45.8 % to 91.7 %). x ARC: cultivares resistentes argentinos; ASC: cultivares susceptibles argentinos; IC: cultivares internacionales. † ProINTA Granar y Klein Don Enrique. ‡ Baguette P 11, Baguette 18, Buck Mangrullo, Klein Guerrero y BioINTA 3000. § Nobeoka Bouzu Komugi, Catbird y Frontana. <sup>1</sup>Grupo de valores promedio de cinco cultivares con altos niveles de severidad (de 42.4% a 61.9%). <sup>2</sup>Grupo de valores promedio de cinco cultivares con altos valores de incidencia (de 71.3% a 96.6%). <sup>3</sup>Grupo de valores promedio de cinco cultivares con un alto número de granos dañados (de 45.8% a 91.7%).

la respuesta a la enfermedad en condiciones climáticas de Argentina y con una cepa local del patógeno. Se confirmó la evaluación de los especímenes considerados resistentes a la enfermedad, según la información dada por el vendedor, proque no hubo diferencias significativas entre los cultivares.

También fue útil un estudio de las líneas de trigo avanzadas con ciclos diferentes de crecimiento obtenidos del programa de mejoramiento del INTA, en la búsqueda de genotipos resistentes a la FET. La



the adjacent groups, the average values of the three groups showed a clear-cut difference among the responses of those three categories of growth-cycle kinetics. All the lines showed infection levels (severity) below 20 %, except T 00212, P 05375 (long growth cycle), T 00219 (medium growth cycle) and T 00224 (short growth cycle). The lines with higher resistance to FTB infection, and severity levels below 30% were characterized as moderately resistant (Table 4). According to Jin *et al.* (2013), for 363 lines from the USA, 43 % were susceptible, 32 % moderately susceptible, and 7.0 % resistant.

This evaluation of the resistance to penetration by the pathogen into the spike (type I) in a high number of wheat genotypes, of three wheat groups with different origin, is relevant to the control of FHB

progresión de la enfermedad se registró de acuerdo con el índice de Fusarium que integra los valores de incidencia, severidad, y la combinación de los dos, expresado como (incidencia x severidad)/100 (Hernández, 2010), y las líneas con valores bajos del índice de Fusarium fueron consideradas resistentes. El nivel más alto de los valores del índice de Fusarium fue para las líneas del ciclo de crecimiento largo, y el nivel menor para las líneas del ciclo de crecimiento corto, mientras que los valores de las líneas de crecimiento intermedio están en el intermedio. A pesar de cierto grado de superposición entre los grupos adyacentes, los valores medios de los tres grupos mostraron una clara diferencia entre las respuestas de estas tres categorías de la cinética del ciclo de crecimiento. Todas las líneas mostraron niveles de infección (severidad) menores a 20 %,

**Table 4. Groups (according to growth cycle) of advanced lines from the INTA breeding program and characterized as resistant to Fusarium head blight.**

**Cuadro 4. Grupos (según el ciclo de crecimiento) de las líneas avanzadas del programa de mejoramiento del INTA caracterizadas como resistentes a la fusariosis de la espiga.**

Lines	Growth cycle	Incidence (%)	Severity (%)	FI
T 00216	Long	12.5	16.1	2.0
J 10004	Long	30.4	12.5	3.8
JN 08005	Long	32.0	12.3	3.9
JN 10005	Long	39.1	11.1	4.4
V 00928	Long	42.1	13.4	5.6
T 00212	Long	44.0	22.3	9.8
P 05375	Long	37.5	27.0	10.1
Averages of lines	50.1	37.0	20.1	
B 20108	Intermediate	11.4	9.2	1.0
T 00219	Intermediate	4.8	34.5	1.6
W 07007	Intermediate	14.3	16.0	2.3
T 00221	Intermediate	13.3	18.1	2.4
J 10010	Intermediate	19.4	15.4	3.0
J 10008	Intermediate	17.6	17.6	3.1
T 00220	Intermediate	25.0	13.7	3.4
Averages of lines	27.9	27.9	8.6	
JN 10019	Short	0.0	0.0	0.0
T 00225	Short	3.6	5.9	0.2
J 10015	Short	7.7	8.7	0.7
T 00223	Short	7.7	9.8	0.8
T 00224	Short	2.9	27.8	0.8
T 00222	Short	9.4	9.2	0.9
P 04842	Short	9.4	10.9	1.0
Averages of lines	19.0	17.0	3.9	

FI: Fusarium index. x FI: Índice de Fusarium.

and improvement in disease outcome, because the information allows characterizing wheat genotypes behavior against the pathogen under conditions similar to those in nature. Therefore, such a research enables the identification of new sources of resistance (Xu *et al.*, 2001; Brennan *et al.*, 2007; Vogelgsang *et al.*, 2008).

Our results suggest that the *F. graminearum* isolate used in assessing the response of different wheat genotypes to infection was highly infective and allowed evaluating the disease in a large number of lines and cultivars. The artificial inoculation used in the experiments insured contact between the pathogen and the host, which facilitated a successful infection and subsequent disease progression.

## CONCLUSIONS

The *Fusarium* isolate used in this investigation was appropriate since the highly infective inoculum allowed us to analyze the progression of the disease in 210 national and international genotypes. We observed and recorded significant differences among the Argentine wheat cultivars in response to the disease, measured as severity, thousand-grain weight, and percent damaged kernels.

The group of international germplasm evaluated showed resistance against the disease since no significant differences were observed among the cultivars. With regard to the Argentine cultivars, new sources of resistance to FHB were discovered since these specimens were previously evaluated, but for other diseases of easier and faster detection than FHB.

The group of advanced wheat lines from INTA, Argentina, responded to FHB challenge with low levels of incidence and severity as expressed in the *Fusarium* index values. Among these lines, the best resistance to FHB occurred with the short-growth-cycle cultivars, followed by the intermediate- and finally the long-growth-cycle genotypes. This response gradient could indicate that the growth cycle *per se* affects the resistance to infection, probably as a result of a shorter time of exposure between anthesis and maturity, thus making those lines an especially preferable choice during years characterized by an increased threat of FHB infection.

excepto T 00212, P 05375 (ciclo de crecimiento largo), T 00219 (ciclo de crecimiento medio) y T 00224 (ciclo de crecimiento corto). Las líneas registraron la mayor resistencia a la infección por la FET, y los niveles de severidad menores a 30 % se caracterizaron como moderadamente resistentes (Cuadro 4). De acuerdo con Jin *et al.* (2013), para 363 líneas de los EE.UU., 43 % fueron susceptibles, 32 % moderadamente susceptibles, y 7.0 % resistentes.

Esta evaluación de la resistencia a la penetración del patógeno en la espiga (tipo I) en un número alto de genotipos de trigo, de los tres grupos de trigo de diferente origen, es relevante para el control de FET e implica mejores resultados en el manejo de la enfermedad, debido a que la información permite caracterizar el comportamiento de los genotipos de trigo frente al patógeno en condiciones similares a las de la naturaleza. Por lo tanto, esta investigación permite identificar nuevas fuentes de resistencia (Xu *et al.*, 2001; Brennan *et al.*, 2007; Vogelgsang *et al.*, 2008).

Nuestros resultados sugieren que el aislamiento de *F. graminearum* utilizado en la evaluación del comportamiento de los diferentes genotipos de trigo a la infección fue altamente infectivo y permitió evaluar la enfermedad en un gran número de líneas y cultivares. La inoculación artificial usada en los experimentos aseguró el contacto entre el patógeno y el huésped, lo que facilitó una infección exitosa y la consiguiente progresión de la enfermedad.

## CONCLUSIONES

El aislamiento de *Fusarium* usado en esta investigación fue apropiado, ya que el inóculo altamente infectivo nos permitió analizar la progresión de la enfermedad en 210 genotipos nacionales e internacionales. Nosotros observamos y registramos diferencias significativas entre los cultivares de trigo de Argentina en respuesta a la enfermedad, medida como nivel de severidad, el peso de mil granos, y el porcentaje de granos dañados.

El grupo de germoplasma internacional evaluado mostró resistencia a la enfermedad, ya que no se observaron diferencias significativas entre los cultivares. Con respecto a los cultivares argentinos, se detectaron nuevas fuentes de resistencia a la FET, porque estos ejemplares se evaluaron previamente, pero para otras enfermedades de detección más fácil y rápida que la FET.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Universidad Nacional de La Plata (Grant 11/X522) and Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (Grant PIP 0925) for financial support, and Bernardina Catalina López for her technical assistance. Dr. Donald F. Haggerty reviewed the final version of the manuscript.

## LITERATURE CITED

- Bai, G. H., and G. E. Shaner. 1994. FHB of wheat: perspective and control. *Plant Dis.* 78: 760-766.
- Bai, G. H., A. E. Desjardins, and R. D. Plattner. 2001. Deoxynivalenol nonproducing *Fusarium graminearum* causes initial infection, but does not cause disease spread in wheat spikes. *Mycopathologia* 153: 91-98.
- Brennan, J. M., G. Leonard, B. M. Cooke, A. Ritieni, R. Ferracane, P. Nicholson, D. Simpson, M. Thomsett, and F. M. Doohan. 2007. Comparison of commercial European wheat cultivars to *Fusarium* infection of head and seedling tissue. *Plant Pathol.* 56: 55-64.
- Cowger, C., J. Patton-Özkurts, G. Brown-Guedira, and L. Perugini. 2009. Postanthesis moisture increased Fusarium head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. *Phytopathology* 99: 320-327.
- Frey, K.J. 1965. The utility of hill plots in oat research. *Euphytica* 2:196-208.
- Galich, M. T. 1997. Fusarium head blight in Argentina. In: Duvin H. J., R. Gilchrist, J. Reeves, and A. McNab (eds). *Fusarium Head Scab: Global Status and Future Prospects*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, México. pp: 19-28.
- Gang, G., T. Miedaner, U. Schuhmacher, M. Schollenberg, and H. H. Geiger. 1998. Deoxynivalenol and nivalenol production by *Fusarium culmorum* isolates differing in aggressiveness toward winter rye. *Phytopathology* 88: 879-884.
- Gilbert, J., and A. Tekauz. 2000. Review: recent developments in research on Fusarium head blight of wheat in Canada. *Can. J. Plant Pathol.* 22: 1-8.
- Gilbert, J., and S. M. Woods 2007. Strategies and consideration for Multi-location FHB screening nurseryies. Session 3: International scab nursery consortium.
- Goswami, R. S., and H. C. Kistler. 2005. Pathogenicity and in planta mycotoxin accumulation among members of *Fusarium graminearum* species complex on wheat and rice. *Phytopathology* 95: 1397-1404.
- Hernandez N., J. F. 2010. Fusarium head blight: Winter wheat cultivar responses and characterization of pathogen isolates. ETD collection for University of Nebraska - Lincoln. Paper AAI3432178. <http://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI3432178> (Access: June 2015)
- InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, UNC, Argentina.
- Jenczmionka, N. J., F. J. Maier, A. P. Losch, and F. J. Schafer. 2003. Mating, conidiation and pathogenicity of *Fusarium graminearum*, the main causal agent of the head blight disease of wheat, are regulated by the MAP kinase gpmk1. *Current Genet.* 43: 87-95.
- El grupo de líneas de trigo avanzadas del INTA, Argentina, respondió al desafío de la FET con niveles bajos de incidencia y severidad, como se expresó en los valores de los índices de Fusarium. Entre estas líneas, las de mejor resistencia a la FET fueron las de ciclo corto de crecimiento, seguidos por las intermedias, y finalmente los genotipos de ciclo largo de crecimiento. Este gradiente de respuesta podría indicar que el ciclo de crecimiento *per se* afecta la resistencia a la infección, probablemente como resultado de un menor tiempo de exposición entre la antesis y la madurez; esto hace que esas líneas sean una opción de preferencia durante los años con una amenaza mayor de infección de la FET.
- Fin de la versión en Español—
- \*—
- Jenczmionka, N. J., and W. Schafer. 2005. The Gpmk1 MAP kinase of *Fusarium graminearum* regulates the induction of specific secreted enzymes. *Current Genet.* 47: 29-36.
- Jin, F., D. Zhang, W. Bockus, P. S. Baenziger, B. Carver, and G. Bai. 2013. Fusarium head blight resistance in U.S. winter wheat cultivars and elite breeding lines. *Crop Sci.* 53: 2006-2013.
- Kikot, G., R. Moschini, F. Consolo, R. Rojo, R. Hours, G. Salerno, L. Gasoni, M. A. Arambarri, and T. M. Alconada. 2011. Occurrence of *Fusarium graminearum* from wheat in relation to climatic models in Argentina Pampas Region. *Mycopathologia* 171: 139-149.
- Kohli, M. M. 1989. Análisis de la Fusariosis del trigo en el cono sur. In: Kohli, M. M. (ed). *Taller sobre la Fusariosis de la Espiga en América del Sur*. México, D.F. CIMMYT. CIMMYT, Asunción, Paraguay. pp: 1-6.
- Leslie, J. F., and B. A. Summerell. 2006. *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing, Ames, IA, USA, 388 p.
- Lori, G., M. Sisterna, M. Haidukowsky, and I. Rizzo. 2003. *Fusarium graminearum* and deoxynivalenol contamination in the durum wheat area of Argentina. *Microbiol. Res.* 158: 1-7.
- Malbrán, I., C. A. Mourellos, J. R. Girotti, M. B. Alicino, P. A. Balatti, and G. A. Lori. 2012. Aggressiveness variation of *Fusarium graminearum* isolates from Argentina following point inoculation of field grown wheat spikes. *Crop Protec.* 42: 234-243.
- Mergoum M., R.C. Froberg, and R.W. Stack. 2007. Breeding hard red spring wheat for Fusarium head blight resistance. Buck, H. T. *et al.* (eds). *Wheat Production in Stressed Environments*. pp: 161-167.
- Mesterházy, A., T. Bartok, C. G. Mirocha, and R. Komoroczy. 1999. Nature of wheat resistance to Fusarium head blight and the role of deoxynivalenol for breeding. *Plant Breed.* 118: 97-110.

- Moschini R.C., M. I. Martinez, y G. Cazenave. 2013. Estimación de la distribución espacial de la incidencia de la FET en la region pampeana para la campaña 2012/13 <http://www.dbbe.fcen.uba.ar/contenido/objetos/INTAIncidenciaFETReginPampeana1.pdf>. (Access: June 2015).
- Moschini, R., and C. Fortugno. 1996. Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *Eur. J. Plant Pathol.* 102: 211-218.
- Nicholson, P., N. Gosman, R. Draeger, M. Thomsett, E. Chandler, and A. Steed. 2007. The Fusarium head blight pathosystem. *In: Buck H. T., J. E. Nisi, and N. Salomon (eds). Wheat Production in Stressed Environments. Develop Plant Breeding, Springer, Dordrecht.* pp: 23-36.
- Proctor, R. H., T. M. Hohn, and S. P. McCormick. 1995. Reduced virulence of *Gibberella zeae* caused by disruption of a trichothecene toxin biosynthetic gene. *Mol. Plant-Microbe Interact. J.* 8: 593-601.
- Saric, M., M. Skrinjar, G. Dimic, N. Filipovic, and J. Rasic. 1997. Changes in hygienic and technological wheat quality caused by mould infection. *Acta Alimentaria* 26: 255-269.
- Schroeder, H. W., and J. J. Christensen. 1963. Factors affecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology* 53: 831-838.
- Šíp, V., J. Chrpová, and L. Štočková. 2011. Evaluation of resistance to Fusarium Head Blight in wheat using different sources of inoculum. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 47: 131-139
- ten Have, A., K. B. Tenberge, J. A. E., Benen, P. Tudzynski, J. Visser, and A. L. van Kan. 2002. The contribution of cell wall degrading enzymes to pathogenesis of fungal plant pathogens. *In: Kempken, F. (ed). The Mycota XI Agricultural Application Springer Verlag, Berlin Heidelberg.* pp: 341-358.
- Vogelgsang, S., M. Sulyok, A. Hecker, E. Jenny, R. Krska, R. Schuhmacher, and H. F. Forrer. 2008. Toxigenicity and pathogenicity of *Fusarium poae* and *Fusarium avenaceum* on wheat. *Eur. J. Plant Pathol.* 122: 265-276.
- Xu, D. H., H. F. Juan, M. Nohda, and T. Ban. 2001. QTLs mapping of type I and type II resistance to FHB in wheat. *In: National Fusarium heading blight. Forum Proceedings, Erlanger, KY. Michigan State University, East Lansing.* pp: 40-42.