

Fotos: INIA

FUSARIOSIS DE LA ESPIGA EN TRIGO Y MICOTOXINAS ASOCIADAS: contribuyendo a reducir su riesgo

Silvia Pereyra¹, Marina Castro², Silvana Vero³, Paula Silva¹, Adrián Cal⁴, Guadalupe Tiscornia⁴, Néstor González¹, Dahiana Bentos¹, William Álvarez¹, Samuel Rabaza¹, Leydi Sevillano¹, Gianella Brancatti³, Carolina Francia⁵, Miguel Raffo¹, Silvia Germán⁶, Carlos Pérez⁵, Gabriela Garmendia³, Lucía Pareja⁷, Alejandra Rodríguez⁸, Cinthia Pendas⁸, Martín Quincke¹, Daniel Vázquez⁹, Marcelo Rodríguez^{1,4}

¹Sistema Agrícola-Ganadero - INIA; ²Evaluación Nacional de Cultivares, Sistema Agrícola-Ganadero - INIA; ³Facultad de Química - Udelar; ⁴GRAS - INIA; ⁵Facultad de Agronomía, Udelar; ⁶Investigadora Emérita - INIA; ⁷CENUR-Litoral Norte, Udelar; ⁸IPTP, Facultad de Química, Udelar; ⁹Agroalimentos - INIA

Los avances de la investigación en los últimos 20 años generando conocimientos en la biología y epidemiología de la FE en nuestros sistemas de producción, en la diversidad de las poblaciones de *Fusarium* y sus toxinas asociadas, y herramientas disponibles para el manejo integrado, asisten en minimizar el riesgo de niveles de micotoxinas y residuos de fungicidas en los granos de trigo por encima de los permitidos.

INTRODUCCIÓN

La fusariosis de la espiga (FE) es una de las principales enfermedades del trigo en Uruguay. Esta enfermedad afecta cada aspecto de la cadena agroindustrial: reduce el rendimiento, la calidad física e industrial del grano y compromete la inocuidad del producto final, como consecuencia de la producción de micotoxinas por parte de los hongos que la causan (*Fusarium spp.*),

perjudiciales para la salud humana y animal. Si bien la FE fue reportada en Uruguay por primera vez en 1928 (Boerger, 1928), la primer epifitía registrada en trigo ocurrió en 1977 y desde entonces se ha investigado ininterrumpidamente a esta enfermedad. Desde los años 90, se estableció como línea de trabajo prioritaria en INIA a través de sucesivos proyectos colaborativos con grupos nacionales (Udelar, MGAP, Mesa Nacional del Trigo, Mesa Nacional de Entidades de Cebada

Cervecera), regionales (PROCISUR, FONTAGRO) e internacionales (CIMMYT, FAO, Universidad de Minnesota, Universidad de Guelph) atendiendo a las necesidades constantes de generación y actualización del conocimiento y de las herramientas para el manejo de la FE y así, minimizar el riesgo de presencia de micotoxinas en el producto.

El objetivo de este artículo es actualizar información sobre los conocimientos, herramientas y estrategias que puedan asistir al manejo de la FE y las micotoxinas asociadas sobre lo presentado en el artículo “Avances en el manejo de la FE en trigo” (Pereyra *et al.*, 2014; [Acceda AQUÍ](#)) y en la presentación en la 3ª Jornada Nacional de Cultivos de Invierno “Reduciendo el riesgo de la fusariosis de la espiga y micotoxinas asociadas (Pereyra *et al.*, 2023; [Acceda AQUÍ](#))”

LA DIVERSIDAD DE LA POBLACIÓN DE FUSARIUM Y SUS IMPLICANCIAS EN LA INOCUIDAD Y EN EL MANEJO

En nuestro país, a través de relevamientos realizados en años con epidemias intermedias a severas (2001, 2002, 2009, 2012 y 2018), se constató a *Fusarium graminearum sensu stricto* (Fgss) quimiotipo 15-acetildeoxinivalenol (15ADON) como la principal especie causando FE dentro del complejo de *F. graminearum* (FGSC) (Pereyra *et al.*, 2006; Pereyra y Dill-Macky, 2010; Umpiérrez-Falaiche *et al.*, 2013; Brancatti *et al.*, 2022). En consecuencia, la principal micotoxina asociada a esta enfermedad en nuestro país es el deoxinivalenol (DON), cuyo contenido en harinas y subproductos está regulado por el decreto 533/001.

Debido a que la composición de la población de patógenos en una misma región no es constante, es necesario realizar el monitoreo con cierta periodicidad para detectar posibles cambios en las especies y quimiotipos, entre otros factores. Conocer la estructura de la población de *Fusarium* en la región del cultivo es fundamental para poder inferir los tipos de micotoxinas que podrían estar contaminando los granos y sus derivados, monitorear la agresividad en plantas y la sensibilidad a fungicidas que se usan para el control de la FE.

La presencia de algunas especies del FGSC, así como otras externas al complejo como *F. poae*, *F. avenaceum* y *F. tricinctum* que han aumentado con el tiempo, indican el riesgo de contaminación del trigo con micotoxinas no reguladas como nivalenol (NIV).

A su vez, encontramos que los aislados de Fgss-15ADON estudiados fueron más agresivos que los potencialmente productores de NIV, tanto en cultivares susceptibles como moderadamente resistentes. Estos resultados sugieren la necesidad de continuar los relevamientos, monitoreando al mismo tiempo la prevalencia y concentración de otras micotoxinas además de DON en el grano cosechado.

Adicionalmente, se detectó un aumento en la tolerancia de las cepas locales de *Fusarium* al tebuconazol, triazol muy utilizado en el pasado para el control de FE o de enfermedades foliares. Esta implicancia se discutirá en el ítem de manejo con fungicidas.

CONDICIONES QUE FAVORECEN LA INFECCIÓN Y DESARROLLO DE LA FE

Los rastrojos de trigo, cebada y maíz representan las principales fuentes de inóculo en nuestros sistemas agrícolas, junto a otras gramíneas como sorgo, componentes de pasturas, malezas y no gramíneas como soja (Pereyra *et al.*, 2014). En estos, se producen ascosporas que son liberadas en periodos con alternancia de alta humedad y secos. Debido al rango amplio de huéspedes en los que *Fusarium* puede sobrevivir y multiplicarse, la rotación con cultivos no susceptibles es una herramienta medianamente eficaz para el control de la FE.

El hongo puede invadir, colonizar y producir micotoxinas desde la etapa de floración (período crítico más susceptible) y durante el llenado de grano (infección tardía predominantemente invasión de tipo saprofito), en tanto ocurran condiciones de humedad y temperaturas favorables. Las condiciones óptimas para la infección son lluvias frecuentes y alta humedad relativa que aseguren mojado de espigas por al menos 2-3 días y temperaturas entre 24-26 °C. Si la infección ocurre en la floración, el grano no se desarrolla mientras que, si sucede durante el llenado de grano, estos pueden tener un tamaño menor (chuzos) hasta normal (Figura 1), pero con contaminación con *Fusarium* y por tanto, con DON. Consecuentemente, cuanto más temprana sea la infección, mayor será el efecto de la FE en el rendimiento, la calidad física e industrial del grano y en la concentración de DON.



Figura 1 - Efecto de *Fusarium spp.* según el momento fenológico del trigo (A) a inicio de llenado de grano, (B) sobre un grano ya formado. En todos los casos es posible tener contaminación con deoxinivalenol (DON).

A su vez, el tiempo de mojado de la espiga ya infectada tiene un efecto sobre la concentración final de DON en grano. El agua libre por un período extendido (> a 30-40 días postfloración) puede producir el lixiviado de la toxina que es soluble en agua y por otra parte, permitir la germinación de esporas de *Fusarium* y posiblemente la ocurrencia de infecciones secundarias (Francia, 2021).

¿QUÉ MEDIDAS DE MANEJO PODEMOS IMPLEMENTAR?

No existe una única herramienta de manejo que proporcione protección total contra la FE. Sin embargo, podemos utilizar las medidas disponibles en forma integrada (Figura 2) en los distintos eslabones de la cadena agroindustrial para minimizar el riesgo de tener niveles inaceptables de DON en el producto final. Específicamente, desde el aspecto agronómico los esfuerzos deben focalizarse en la combinación de prácticas que incluyan: el uso de cultivares moderadamente resistentes a la FE y de menor producción de DON, si se pronostican condiciones favorables para la infección, la aplicación de los fungicidas más eficientes, en floración, intentando la mayor cobertura posible de la espiga. En este último punto, es posible integrar herramientas como los sistemas de predicción, como, por ejemplo, DONcast, [Acceda AQUÍ](#)

CULTIVARES RESISTENTES

Luego de las condiciones climáticas, la resistencia del cultivar es un factor fundamental en determinar los niveles de FE y DON.

El área sembrada en Uruguay en 2023 con cultivares con resistencia moderada a FE fue apenas un 12 % del total (Figura 3), lo que representó una amenaza ante la ocurrencia de condiciones conducivas para la enfermedad. En años epidémicos, los niveles de DON en cultivares caracterizados con susceptibilidad intermedia pueden ser tan altos como en los susceptibles (Francia *et al.*, 2020; Francia, 2021). Al comienzo de cada zafra, en base a la información de viveros específicos para FE y ensayos de INASE-INIA, se actualiza y publica el comportamiento de los cultivares registrados y en producción frente a su comportamiento a esta enfermedad (Castro, M. *et al.* 2019-2023). [Acceda AQUÍ](#)

En materiales de interés, la información se ha complementado con determinaciones de % de granos con *Fusarium* a cosecha, contenido de DON (Francia *et al.*, 2020) y estudios de caracterización del tipo de resistencia II (resistencia del material de trigo a la dispersión del hongo en la espiga).

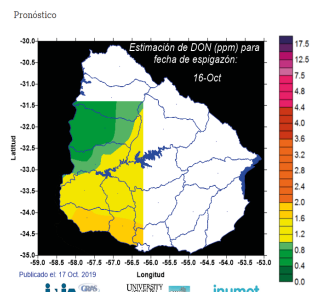
Manejo integrado



Cultivares resistentes



Fungicidas



Sistemas de alerta + pronósticos

DONCAST <http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/>

Prácticas a cosecha y postcosecha:

- Cosechar separadamente las áreas identificadas con menor infección de las de mayor infección
- Aumentar el caudal de viento en la cosechadora
- Limpieza y segregación del grano
- Chequear el porcentaje de granos con *Fusarium* o contenido de DON
- Adecuar procesamiento industrial contenido de DON del lote (dilución, extracción de harina)



Figura 2 - La adopción de prácticas de manejo en forma integrada es clave para reducir el contenido de micotoxinas en el grano cosechado y en los productos finales.

El avance genético del mejoramiento por resistencia a FE ha sido lento en el mundo debido a que es una característica de herencia compleja (cuantitativa) y su expresión es altamente influenciada por el ambiente. En el Programa de Mejoramiento Genético de Trigo (PMGT) de INIA, desde hace más de cuatro décadas se ha priorizado la obtención de cultivares resistentes a FE. Producto de este trabajo se han registrado cultivares con niveles de resistencia entre moderadamente resistente a intermedio como Génesis 2375, Génesis 6,87, Génesis 4,33 y Génesis 5,55 (Castro *et al.*, 2023). La principal base de resistencia del PMGT es de origen brasileño-japonés. Fhb1, proveniente de Sumai 3, es el gen de resistencia más utilizado a nivel mundial, sin embargo, está en muy baja frecuencia en nuestro germoplasma. En los últimos años, se han generado líneas adaptadas,

con resistencia a FE proveniente de ORL99192 (base principal de la resistencia en el PMGT) a las que se les introgresó el gen Fhb1 y el gen de resistencia a roya del tallo Sr2. La selección por presencia de Fhb1 se realizó con marcadores moleculares y resultó en un incremento significativo de la resistencia a FE en estos materiales. Además, estamos prospeccionando resistencia nueva de especies cercanas a trigo, para incorporar en el germoplasma adaptado, así como en el desarrollo de herramientas que aceleren los procesos de incorporación de la resistencia y obtención de cultivares resistentes.

LA EFECTIVIDAD DE LA APLICACIÓN DE FUNGICIDAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA DEL CULTIVAR

El momento óptimo para el control químico es inicio de floración, en base a pronósticos climáticos y/o sistema de predicción de DON. La efectividad de esta práctica es muy dependiente de las condiciones climáticas, en tanto las mismas que favorecen la infección (lluvias) pueden impedir la aplicación del fungicida. A ello se suma la variabilidad de los estados fenológicos en cada chacra (Pereyra *et al.*, 2014). En estados avanzados del llenado de grano (a partir de $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ grano desarrollado) no se recomiendan aplicaciones de fungicidas en tanto hemos encontrado que los niveles de DON pueden ser similares a un testigo sin fungicida (Pereyra *et al.*, 2023; Cuadro 1).

Las mayores eficiencias de control de FE y menor contenido de DON se obtienen con aplicaciones de fungicidas triazoles o mezclas de triazoles como metconazol + epoxiconazol, protioconazol + tebuconazol, eventualmente tebuconazol (solo o en combinación con carbendazim). La eficiencia de control de fungicidas para el control de FE y otras enfermedades de trigo se presenta en el siguiente enlace: [Acceda AQUÍ](#)

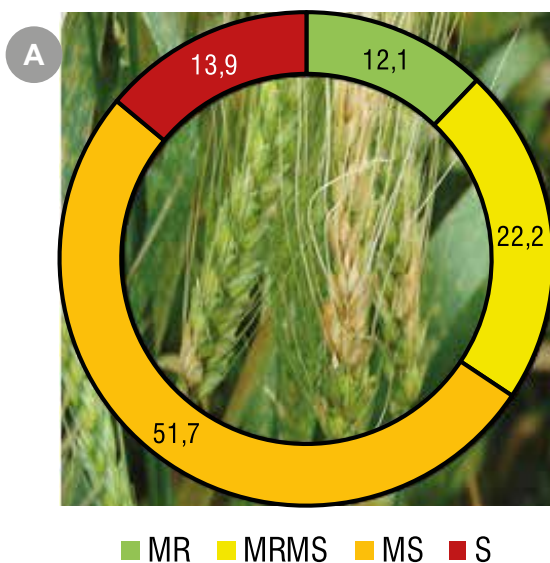


Figura 3 - A) Porcentaje del área de trigo sembrada en 2023 con cultivares con diferente comportamiento frente a la fusariosis de la espiga (Castro *et al.*, 2019-2023). MR: moderadamente resistente; MRMS: MR a moderadamente susceptible; MS: susceptibilidad intermedia-alta; S: susceptibilidad alta a muy alta (modificado de DIEA, 2023). B) Cultivar susceptible vs. cultivar moderadamente resistente.



Figura 4 - Inoculación de espigas de materiales de trigo en condiciones controladas para caracterización del tipo II de resistencia (resistencia a la dispersión del Fusarium en la espiga).

Cuadro 1 - Efecto del manejo integrado fungicida*momento de aplicación*resistencia del cultivar.

Factor	AUDPC (FE)	FDK (%)	DON (ppm)
CULTIVAR			
INIA D.ALBERTO (S)	195.3 ^a	7.33 ^a	10.1 ^a
GENESIS.6.87 (MR)	43.5 ^b	2.00 ^b	2.9 ^b
FUNGICIDA			
PROSARO	128.4 ^a	5	6,9
SWING PLUS	110.4 ^b	4,33	6,1
MOMENTO			
ZGS61	79.6 ^b	4.50 ^{ab}	4.9 ^b
ZGS65	80.8 ^b	3.50 ^b	5.0 ^b
ZGS71	197.8 ^a	6.00 ^a	9.7 ^a

S: susceptible a FE, MR: moderadamente susceptible; ZGS61: inicio de floración; ZGS65: floración; ZGS71: ¾ grano-acuoso; PROSARO: tebuconazol+prothioconazol; SWINGPLUS: metconazol+epoxiconazol). Valores medios con la misma letra no son diferentes significativamente al $p = 0.05$, según Tukey o estadístico de máxima verosimilitud χ^2 , según corresponda.

En tanto los productos no actúan por sistema sino principalmente por contacto, es fundamental asegurar una buena calidad de aplicación, con aspersores capaces de depositar el fungicida en ambos lados de la espiga (ej. TurboTwinJet60°).

Los niveles significativamente bajos de sensibilidad a tebuconazol de cepas de *Fusarium spp.* obtenidas en el último relevamiento (2018) indicarían que podrían ser resistentes a este ingrediente activo en condiciones de campo. La confirmación de esta hipótesis con análisis adicionales de laboratorio y campo, podría conducir a cambios en las prácticas de manejo de la FE con fungicidas. La mayoría de las cepas evaluadas son sensibles al resto de los triazoles utilizados en el control de FE (prothioconazol, epoxiconazol y metconazol) y que integran mezclas utilizadas para el manejo de enfermedades foliares.

Los resultados de trabajos en el período 2014-2020 demostraron que el uso de cultivares resistentes, junto con la aplicación en floración de los fungicidas más eficientes, determinan los menores niveles de DON (iguales o menor a 2 ppm en grano), por tanto, comercializable y posible de ser utilizado por la industria para la obtención de harinas y subproductos con menos de 1 ppm de DON. En ningún caso se detectaron residuos de fungicidas por encima de los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por el Codex y la UE (CAC, 2019; Commission Regulation, 2016).

REFERENCIAS

Boerger, A. 1928. Observaciones sobre agricultura, quince años de trabajos fitotécnicos en Uruguay. Montevideo. 436p.

Brancatti, G. *et al.* 2022. Current species composition of *Fusarium* population affecting the main wheat-growing regions in Uruguay and evolution of their sensitivity to triazoles after long-term application. *International Journal of Pest Management*, 68:349–358. <https://doi.org/10.1080/09670874.2022.2129509>

CAC (Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission) 2019. Standard for wheat and durum wheat. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/es/>

Castro, M. *et al.* 2019-2023. Caracterización sanitaria de cultivares de trigo y cebada. INIA Uruguay. <http://inia.uy/estaciones-experimentales/direcciones-regionales/inia-la-estanzuela/caracterizaci%C3%B3n-sanitaria-de-cultivares-de-trigo-y-cebada>

Commission Regulation (EU) 2016/1902, Pub. L. n.o 2016/1902 (2016). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016R1902>

Díaz de Ackermann, M., Pereyra, S. 2011. Fusariosis de la espiga de trigo y cebada. Pp 111-128 In: Pereyra S, Díaz M, Germán S, Cabrera K (eds) Manejo de enfermedades de trigo y cebada. Serie Técnica 189. INIA Uruguay. Ed. Hemisferio Sur. Montevideo. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429160911193955.pdf>

Francia, C. 2021. Estudio de factores determinantes de la concentración de deoxinivalenol en grano de trigo. Tesis de Maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Agronomía. 114p. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/31626/1/FranciaCarolina.pdf>

Francia, C. *et al.*, 2020. Caracterización de los cultivares a la fusariosis de la espiga y la acumulación potencial de micotoxina DON en el grano <https://www.youtube.com/watch?v=GloKPx6YujY>

Pereyra, S. *et al.* 2006. Diversity of Fungal Populations Associated with Fusarium Head Blight in Uruguay. In: Ban, T., J.M. Lewis, and E.E. Phipps (eds.) The Global Fusarium Initiative for International Collaboration: A Strategic Planning Workshop held at CIMMYT, El Batán, Mexico; March 14-17 2006. México, D.F.:CIMMYT., pp.35-41.

Pereyra, S. *et al.* 2014. Avances en el manejo de la fusariosis de la espiga. *Revista INIA* 37:43-50. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7083/1/revista-INIA-37-p.43-50.pdf>

Pereyra, S., Dill-Macky, R. 2010. Fusarium species of wheat and barley grains in Uruguay, their pathogenicity and deoxynivalenol content. *Agrociencia (Uruguay)* 14:33-44. <https://doi.org/10.31285/AGRO.14.625>

Raffo, M. *et al.* 2022. Introgression of the coupled Fhb1-Sr2 to increase Fusarium head blight and stem rust resistance of elite wheat cultivars. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization* 20:36–45. <https://doi.org/10.1017/S1479262122000107>

Umpierrez-Falaiche, M. *et al.* 2013. Regional differences in species composition and toxigenic potential among Fusarium head blight isolates from Uruguay indicate a risk of nivalenol contamination in new wheat production areas. *International Journal of Food Microbiology* 166:135-140.



Figura 5 - Síntomas típicos de fusariosis de la espiga en cultivo de trigo.