Biblioteca Digital
FCEN-UBA

BIBLIOTECA CENTRAL LUIS F LELOIR
BIBLIOTECA CENTRAL LELOIR
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES UBA

Tesis Doctoral

Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la espiga de trigo (Triticum aestivum L.) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana

Moschini, Ricardo Carlos

2011

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:
Moschini, Ricardo Carlos. (2011). Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la espiga de trigo (Triticum aestivum L.) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Cita tipo Chicago:
Moschini, Ricardo Carlos. "Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la espiga de trigo (Triticum aestivum L.) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2011.

EXACTAS UBA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

UBA
Universidad de Buenos Aires

Dirección: Biblioteca Central Dr. Luis F. Leloir, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA - Tel. (++54 +11) 4789-9293

Contacto: digital@bl.fcen.uba.ar

Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la Espiga de Trigo (*Triticum aestivum L.*) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana

Ricardo Carlos Moschini

Tesis presentada para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en al área Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Directores de Tesis: Dra. Susana Bischoff
Dr. Alberto Raul Escande

Jurado de Tesis: Dra Olga Penalba
Dra Adelia Perla Alessandro
Ing Agr Guillermo March

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos
Buenos Aires, 11 de abril 2011

A la memoria de

mi papá Alberto

mi consejeta de estudio y directora de tesis Susana Bischoff

Dedicada a

A mi mamá Susana por trasmitirme que con paciencia y persistencia en el esfuerzo se pueden alcanzar metas.

A mis hijos María Belén y Juan Ignacio, Dios quiera que pueda aportar al espejo donde se miren en sus vidas.

Agradecimientos

Al Dr Alberto Escande por su valiosa participación en el desarrollo de la tesis.

A la entrega positiva de amigos y compañeros del Instituto de Clima y Agua del INTA Castelar.

Al apoyo recibido de muchos profesores y compañeros de estudios del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

INDICE

RESUMEN……..... 6

ABSTRACT……. …….. 7

INTRODUCCION……..... 8

CAPITULO I

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FUSARIOSIS DE LA ESPIGA DE TRIGO (FET)……..……. 15

1 INTRODUCCIÓN……. 15

2 DESARROLLO DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FET……..… 17

2-1 Enfoque Empírico: sistema de pronóstico de la incidencia de la FET (Pergamino) ……...…….. 17

2-2 Enfoque Fundamental – Empírico: sistema de prónóstico del Índice de Fusarium (Pergamino-M. Juárez)…… 19

3 VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FET…….. 23

3-1 Sitio: Pergamino…… 23

3-2 Sitios al norte de Pergamino…… 23

3-2-1 Sitios: Zavalla y Oliveros……. 23

3-2-2 Sitio: Oliveros……. 24

3-3 Sitios al Sur de Pergamino…… 26

3-3-1 Sitio: Balcarce……. 26

3-3- 2 Sitios: La Dulce, Miramar y Balcarce…….. 26

3-3- 3 Sitios: Balcarce y Barrow……..……. 28

4 DISCUSIÓN…….. 30

5 CONCLUSIONES……. 33

CAPÍTULO II

SITUACIONES METEOROLÓGICAS SINÓPTICAS ASOCIADAS A LA OCURRENCIA DE EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET EN TRES SITIOS DE LA REGIÓN PAMPEANA…….. 34

1 INTRODUCCIÓN……34

2-1 CARACTERIZACIÓN DE TIPOS SINÓPTICOS ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET……. 38

2-1-1 MATERIALES Y MÉTODOS……. 38

2-1-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN…… 39

2-1-2-1 Sitio: Paraná…….…… . 39

2-1-2-1 Sitio: Pergamino.…… 47

2-1-2-1 Sitio: Balcarce…..……. 55

2-1-3 CONCLUSIONES…….... 63

2-2 INFLUENCIA DE SITUACIONES DE ACCIÓN BLOQUEANTE (SUR DE SUDAMÉRICA) SOBRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET…….. 65

2-2-1 MATERIALES Y MÉTODOS…… 65

2-2-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN……... 67

2-2-3 CONCLUSIONES…… .. 76

2-3 SITUACIONES DE ACCIÓN BLOQUEANTE EN RELACIÓN A LOS TIPOS SINÓPTICOS DOMINANTES ASOCIADOS A EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET…… 78

2-3-1 MATERIALES Y MÉTODOS……. . 78

2-3-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN……. 78

2-3-3 CONCLUSIONES…….. 81

CAPÍTULO III

PREDICTORES METEOROLÓGICOS EN LA ESCALA HEMISFÉRICA ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE NIVELES DE INCIDENCIA DE LA FET, EN ÁREAS HOMOGÉNEAS DE LA REGIÓN PAMPEANA…… 82

1 INTRODUCCIÓN…… … 82

2 MATERIALES Y MÉTODOS…… 85

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN…….. 88

4 CONCLUSIONES…… 95

CONSIDERACIONES FINALES…… 97

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS…….…….. 100

Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la Espiga de Trigo (*Triticum aestivum L.*) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana

RESUMEN

La fusariosis de la espiga de trigo (FET) causada por el hongo *Fusarium graminearum* constituye una amenaza multifacética al afectar tanto al rendimiento y calidad del trigo como a la salud humana por acción de micotoxinas. La naturaleza esporádica de la FET relacionada fuertemente al factor ambiental, estimularon el desarrollo y validación de sistemas empíricos y fundamental-empírico de pronóstico, corridos con elementos meteorológicos simples de paso diario. Ambos sistemas reconocen eventos infectivos por mojado de la espiga combinando la ocurrencia de precipitación y altos registros de humedad relativa. Sus predicciones retrospectivas de intensidad de la enfermedad en la región pampeana permitieron abordar estudios para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos de creciente escala espacio-temporal relacionados al patosistema, base de pronósticos meteorológicos específicos de corto plazo y estacionales. Para Paraná, Pergamino y Balcarce se caracterizó el campo medio de circulación (altura geopotencial en el nivel de 1000 hPa) asociado a infecciones severas y ligeras de la FET y se demostró la fuerte influencia de situaciones de acción bloqueante en el sur de Sudamérica sobre la ocurrencia de eventos infectivos. Una configuración que manifiesta un debilitamiento de los vientos patagónicos del oeste se visualizó en el mapa de anomalía media de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de infecciones severas de la FET en Pergamino. En el NE-centro Este de la región pampeana se encontró que niveles mayores de enfermedad se relacionaron con valores crecientes del índice MAS (Modo Anular del Hemisferio Sur) en agosto y con dominancia de circulación meridional N-NE en setiembre. En el sur el IOS (índice de Oscilación del Sur) y variables asociadas a la ocurrencia de situaciones bloqueantes aportaron significativamente para clasificar correctamente las principales epifitias. Algunos de estos índices se incluyeron en modelos logísticos para estimar la probabilidad de ocurrencia de niveles epidémicos de la FET.

Palabras claves: fusariosis de la espiga de trigo, sistemas de pronóstico, tipos sinópticos, situaciones de acción bloqueante, predictores en escala hemisférica, modelos logísticos

Development and use of Fusarium head blight forecasting systems in wheat (*Triticum aestivum L.*) for identifying synoptic situations and meteorological predictors in different scales associated to the disease in the Pampas region

ABSTRACT

In Argentina, Fusarium head blight (FHB) is a highly risky disease (caused by *Fusarium graminearum* Schwabe) of wheat, affecting not only grain yield and quality but also human health because of associated micotoxins. The sporadic nature of FHB strongly related to environmental factors, stimulated the development and validation of empirical and fundamental-empirical forecasting systems, running with simple daily meteorological data. Both systems recognize infective events by head wetting combining the simultaneous occurrence of precipitation and high relative humidity. Retrospective model predictions of disease intensity in Pampas region were able to carry out studies to identify synoptic situations and meteorological predictors of increasing space-temporal scale regarding the pathosystem, needed to develop specific short-range and seasonal weather forecasts. The mean fields of circulation (1000 hPa geopotential height) associated to severe and light FHB infections in Paraná, Pergamino and Balcarce were characterized. The strong influence of blocking action situations in the southern of South America on infection events was also showed. A configuration pointing out a weakness of Patagonia westerly winds was observed in the mean anomaly map (1000 hPa geopotential height) for the inicial day of FHB severe infection events in Pergamino. In NE and central-eastern Pampas region, greater disease levels are expected with greater August SAM (Southern Annular Mode) values and dominance of meridional N-NE circulation in September. In the southern Pampas region, the SOI (Southern Oscillation index) and the variables associated to the occurrence of blocking action situations in the south of the continent (October), strongly helped to explain disease level variability. Logistic models were adjusted with some of these indexes for estimating the probability of occurrence of FHB epidemics

Keywords: wheat Fusarium head blight, forecasting systems, synoptic types, blocking action situations, hemispheric-scale predictors, logistic models

INTRODUCCION

Pérdidas estimadas en 10 % de la producción global de alimentos por efecto de enfermedades de cultivos contribuyen a exacerbar el déficit alimentario que padecen 800 millones de personas (Strange and Scott, 2005). A pesar de las prácticas de protección vegetal de uso frecuente en estos tiempos las pérdidas en el trigo asociadas a las malezas, plagas animales y enfermedades se estiman en 50 % (Oerke, 2006). Además de estas mermas directas, algunos hongos (*Aspergillus, Fusarium y Penicillium*) que colonizan el cultivo en campo o en post-cosecha pueden producir metabolitos tóxicos secundarios (micotoxinas: aflatoxinas, tricotecenos, fumonisinas, ocratoxinas y alcaloides ergot), que contaminan alimentos y generan riesgos sanitarios para los seres humanos y animales (Prandini *et al*., 2008).

La fusariosis de la espiga de trigo (FET) es una enfermedad fúngica importante que ha re-emergido intensamente en los últimos años, en muchas regiones del mundo (De Wolf and Scott, 2007). Entre las causales probables de la diseminación y re-emergencia de la FET se citan la fuerte adopción de sistemas de labranza mínima y siembra directa, rotaciones cortas con maíz y el cambio y variabilidad climática global (McMullen *et al*., 1997). Los principales agentes causales de la FET son *Fusarium culmorum, F. graminearum, Microdochium nivale var nivale y var majus, F. avenaceum y F. poae.* La distribución y predominancia de estos patógenos están determinadas en gran parte por factores climáticos como la temperatura y la humedad. En Europa, Xu *et al*. (2008) encontraron que *F. graminearum* estuvo asociado a condiciones más cálidas y húmedas que las otras especies citadas. En Argentina, el agente fúngico dominante relacionado a la FET es *Fusarium graminearum* (Schwabe) anamorfo de *Gibberella zeae* (Schw.) Petch. (Galich y Galich, 1994; Kikot *et al*., 2010). La FET es considerada una enfermedad floral y monocíclica, con una fase inicial parasítica en la cual el patógeno se desarrolla sobre tejidos colonizados funcionales y otra saprofítica sobre tejidos muertos. Los propágulos del hongo pueden ser macroconidios, ascosporas, clamidosporas y fragmentos de hifas. *Gibberella zeae* sobrevive como saprófito en residuos de numerosos cultivos hospedantes (trigo, avena, cebada, maíz, alfalfa y arroz) y de muchas gramíneas nativas y malezas (Reis y Carmona, 2002), formando fructificaciones sexuales (peritecios con ascosporas). También se han encontrado peritecios en rastrojos (Fernández and Fernandes, 1990) y en semillas de soja (Panisson *et al*., 2000) En Argentina, las fructificaciones de *G. zeae*

constituyen la más importante fuente de inóculo del patógeno, diferenciándose de Norte América donde Markell and Francl (2003) encontraron que ascosporas y conidios (relación 2:1) juegan un rol importante como inóculo primario. En Brasil, Reis (1988) y Panisson *et al.* (2002) observaron una relación de ascosporas y macroconidios atrapados de 9,8:0,2 y 9:1, respectivamente. Reis y Carmona (2002) concluyeron que los restos culturales infectados de cereales de invierno y los sustratos donde se forman saprofíticamente los peritecios garantizan la disponibilidad de inóculo anual, principalmente en los períodos de floración. Las ascosporas liberadas por los peritecios son diseminadas por el viento a grandes distancias, se depositan sobre las anteras expuestas de espigas de trigo, germinan y colonizan las flores. Como consecuencia, no hay formación de granos o crecen en forma deficiente (chuzos) (Figura 1). Las espiguillas afectadas sufren una despigmentación característica (Figura 2).

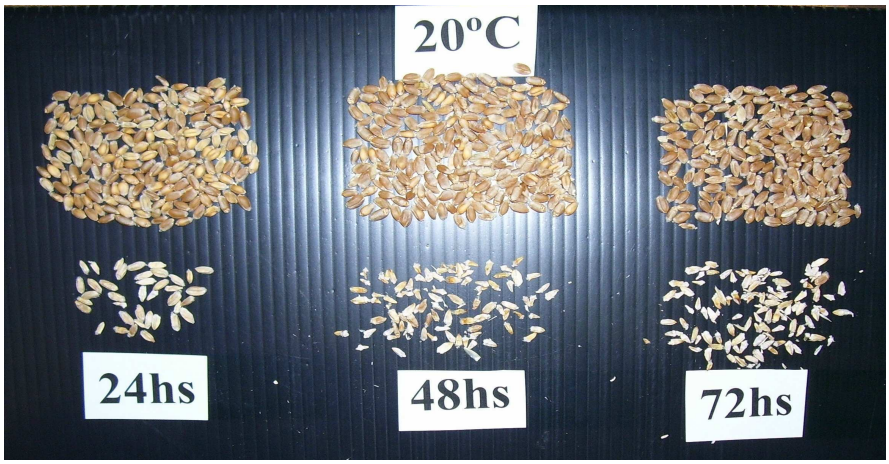

Figura 1. Granos de trigo chuzos (abajo) provenientes de espigas inoculadas artificialmente con conidios de *Fusarium graminearun* a 20°C y tres duraciones de mojado (cámara ambiente controlado) versus granos de espigas (arriba) sin inocular (Martínez, 2009)

Figura 2. Síntoma característico en espiguillas afectadas por la fusariosis de la espiga de trigo (Martínez, 2009)

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMyT) ha identificado a la FET como el principal factor limitante de la producción de trigo en muchas regiones del mundo (Bai and Shaner, 1994; Xu, 2003). En la región pampeana de Argentina donde se concentra el cultivo de trigo, se registraron epidemias severas de la FET en 1967, 1977, 1978 y 1993. En el sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, las pérdidas de rendimiento en trigo oscilaron entre 10 y 30 % en 1978 y entre 24 y 50 % en 1993 (Galich y Galich, 1996). Otra epifitia severa se produjo en el ciclo 2001/02 en el cuadrante NE de la región pampeana. En el sudeste del área triguera Argentina, donde se concentra el cultivo de trigo fideo (*Triticum durum* Desf.), ocurrieron graves epidemias de la FET en 1963, 1976, 1978 y 1985. Ensayos conducidos en Pergamino, Buenos Aires, mostraron que por acción del patógeno, el número de granos sufrió reducciones más severas que el tamaño de los mismos (Annone y Frutos, 1988).

La interacción simultánea o sincrónica entre hospedante, patógeno y ambiente gobierna el desarrollo de una enfermedad (De Wolf and Scott, 2007). La abundancia de inóculo primario y las condiciones meteorológicas (duración de mojado y temperatura) durante y después de la antesis determinan la severidad de la FET (Bai and Shaner, 2004). En general se señala que la FET es una enfermedad de climas cálidos y húmedos. La temperatura óptima para la infección se sitúa entre 20 y 30°C (Andersen 1948; Sutton, 1982). Andersen (1948), en ambiente controlado, no logró infección inoculando con macroconidios (*G. zeae*) a temperaturas de 15 °C y duraciones de mojado de 18 a 72 h. La intensidad de la FET aumentó marcadamente a partir de 20 °C, con lapsos de mojado entre 48 a 72 h. Inoculando con cepas del hongo de la región pampeana, Martínez (2009), en ensayos en cámara, no consiguió expresión de síntomas a 9°C. A partir de 15°C observó una respuesta creciente en la intensidad de la FET ante incrementos de la duración de mojado (24 a 72 h). Zoldan (2008 b), en ambiente controlado, observó severidades de 68 % con mojados superiores a las 35 h y temperaturas de 25°C. También, comparando con el trabajo de Andersen (1948), estos autores observaron niveles bajos de enfermedad a 10°C, concluyendo que el hongo está adaptándose a temperaturas inferiores y es más agresivo El trigo es susceptible a la enfermedad desde antesis hasta grano pastoso suave debido a la presencia de anteras senescentes semi-expuestas entre las glumelas, luego de la polinización (McMullen *et al*., 1997). De Souza y Formento (2004) observaron un período total de espigas con anteras expuestas de 20 y 21 días, en dos variedades de trigo argentinas (Paraná, campaña 2003/04). Reis (1989) señaló que el proceso de antesis puede extenderse hasta

4 días en una espiga, 12 días en una planta y 30 días en un lote de cultivo. Las anteras constituyen un sustrato rico en nutrientes, especialmente betaína y colina (Strange *et al.*, 1974), que acelera el desarrollo fúngico y la entrada a las flores individuales. Espigas de trigo con anteras removidas observaron menores tasas de infección, demostrando su efecto sobre el desarrollo de la FET (Strange and Smith, 1971). Una mayor proporción de anteras retenidas dentro de las espiguillas y de anteras presas (extrusión parcial, presas entre lemma y palea), se relacionó débilmente con cultivares de trigo de susceptibilidad creciente a la FET (Graham and Browne, 2009).

La complejidad de la FET y su amenaza multifacética al afectar tanto al rendimiento y calidad de la producción granaria como a la salud humana y animal por acción de las micotoxinas asociadas, imponen el uso de estrategias de manejo de la enfermedad múltiples e integradas. Bai and Shaner (2004) consideran que la utilización de cultivares de trigo resistentes es crucial para reducir daños de la FET, en un enfoque integrado. El cultivar de origen chino Sumai 3 y sus derivados proveen actualmente el máximo grado de resistencia tipo II (menor velocidad de invasión). A la fecha no están disponibles cultivares de trigo altamente resistentes a la enfermedad o tolerantes a las micotoxinas (Goswami and Kistler, 2004). Este hecho se explica en la complejidad de la herencia de la resistencia, la pobre aptitud agronómica y la baja calidad de las principales fuentes de resistencia (Galich, 2004). La imposibilidad de un control adecuado de la FET por medio de la rotación de cultivos (control cultural) se fundamenta en la marcada ubicuidad de las especies del género *Fusarium*, su amplia gama de hospedantes y la alta diseminación anemófila de las esporas, que pueden ser transportadas desde fuentes distantes (Reis y Carmona, 2002; Saharan *et al*., 2004). Schaafsma *et al*. (2001) en Ontario (Canadá) encontraron que solo el 27 % de la variación del contenido de la micotoxina DON ligada a *Fusarium* se asoció a los cultivares, no habiendo detectado efectos por sistemas de labranza y tipo de fertilización nitrogenada (observaciones de 3 años en condiciones naturales de campo). En Argentina, Lori *et al*. (2009) concluyeron que las condiciones meteorológicas imperantes en 3 años sucesivos de ensayos de trigo fueron cruciales para explicar las variaciones en los niveles observados de la FET, comparado con el efecto de sistemas de labranza y otras prácticas agronómicas. En relación al control químico, Bai and Shaner (2004) sostienen que los fungicidas pueden ser útiles cuando las condiciones meteorológicas u otras culturales son particularmente favorables para el desarrollo epidémico. Los fungicidas aplicados en antesis pueden ayudar a prevenir pérdidas

económicas, pero su eficacia depende del momento de aplicación y tecnología para lograr una buena cobertura de la espiga (Del Ponte *et al.*, 2004). Las infecciones establecidas no pueden ser revertidas con los fungicidas actuales (principalmente bencimidazoles y triazoles o sus mezclas), razón por la cual, las aplicaciones deben realizarse en forma preventiva (antes que ocurran) o semi-preventivas (máximo 2 a 3 días posteriores al evento infectivo). En este último caso pueden darse limitaciones de "piso" para que opere una máquina aplicadora terrestre, normalmente más eficiente que los tratamientos con aviones (Annone, 2003).

La naturaleza esporádica de la enfermedad, asociada fuertemente al factor ambiental, hacen posible que el patosistema pueda ser modelado matemáticamente. Por ello, el desarrollo de un sistema de pronóstico de la FET es considerado clave para integrarlo al manejo de la enfermedad, y ayudar a decidir los momentos adecuados del control químico o predecir la intensidad de la FET. Los modelos de pronóstico de enfermedades pueden clasificarse en empíricos, basados en relaciones estadísticas entre variables ambientales y la enfermedad, y en modelos fundamentales-mecanísticos derivados de experimentos de laboratorio, invernáculo o campo, con control ambiental de la inoculación asistida (Krause and Massie, 1975). Enmarcados en ambos enfoques, después del trabajo de Andersen (1948), que estableció los porcentajes de infección en espigas de trigo inoculadas artificialmente con conidios de *F. graminearum* ante distintas temperaturas y duraciones de mojado, se sucedieron en los últimos 15 años múltiples estudios de desarrollo de sistemas de predicción de la FET y/o su micotoxina asociada (Deoxinivalenol: DON) (Moschini and Fortugno, 1996; Moschini *et al.*, 2002; Hooker *et al*., 2002; De Wolf *et al.* ,2003; Detrixhe *et al.* ,2003; Rossi *et al*., 2003; Del Ponte *et al*., 2005; Franz *et al*., 2009; Martínez, 2009).

Las condiciones meteorológicas se han usado extensamente para la toma de decisión en el control de enfermedades. La mayoría de los sistemas de alarma de enfermedades se operan con información meteorológica observada, lo cual no los hace completamente predictivos para anticiparse suficientemente en la aplicación de fungicidas. A pesar de acordar que el uso de pronósticos meteorológicos podría mejorar las técnicas predictivas de enfermedades basadas sólo en datos observados, son pocos los sistemas que los utilizan para realmente predecir la infección u otro evento epidemiológico (Wallin and Riley,1960; Scarpa and Raniere, 1964; Davis and Snow, 1968; Vincelli and Lorbeer 1988; Royer *et al.* ,1989; Raposo *et al*.,1993; Baker and Kirk, 2007). Bourke (1970) señaló el valor potencial de analizar la secuencia de factores

meteorológicos que favorecen una enfermedad e identificar los tipos de situaciones meteorológicas recurrentes sobre cartas sinópticas, complementando el rol ejercido por modelos simples de predicción. Para identificar y clasificar patrones de circulación atmosférica se dispone de técnicas cada vez más objetivas de correlación y análisis multivariado (Rusticucci and Vargas 1995; Lund, 1963; Compagnucci *et al*., 2001; Bischoff y Berman, 2005; Escobar *et al*. ,2003; Alessandro, 2003). También se pueden asociar niveles de expresión epidémica en cultivos relevantes a la variabilidad climática generada por fenómenos de crecientes escalas espacio-temporales. Varios estudios relacionaron el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) con las variaciones interanuales de enfermedades fúngicas, incluida la FET, en varias regiones del planeta (Zhao and Yao, 1989, Scherm and Yang, 1995; Wright and Hansen, 1997; Meinke and Ryley, 1997; Del Ponte *et al*., 2009) y en Argentina (Moschini *et al*., 1999, Moschini, 2006; Moschini and Bischoff, 2007). Otros índices correspondientes a fenómenos como el Modo Anular del Sur (MAS) u Oscilación Antártica (Silvestri and Vera, 2003; Garreaud *et al*., 2009), el índice (I) zonal usado para identificar situaciones de acción bloqueante en el sur de Sudamérica (Alessandro, 2003 a, 2003 b y 2008) o los que analizan la intensidad y posicionamiento de los anticiclones Atlántico-Pacífico (Camilioni *et al*., 2005) se han estudiado en relación a la variabilidad observada en la temperatura y precipitación de Argentina, con posibilidades ciertas de inferir efectos sobre la ocurrencia de enfermedades fúngicas en cultivos como la FET.

Resumiendo, la disponibilidad de sistemas de pronóstico validados de la FET es crucial para realizar estudios relativos a la caracterización sinóptica de segmentos temporales con ocurrencia de eventos de infección, y así derivar pronósticos meteorológicos específicos para el patosistema. Estos pronósticos podrán integrarse al proceso de toma de decisión de control químico de la FET, de baja eficiencia por los factores señalados previamente. También será factible asociar la variabilidad espacio-temporal de niveles epidémicos estimados por modelos, a múltiples predictores meteorológicos de escala hemisférica y de esta forma elaborar pronósticos estacionales de la intensidad esperada de la FET, con antelación al período susceptible del cultivo y/o momento de posible control químico.

Objetivos de la tesis

Objetivo 1: desarrollar y validar, para distintos sitios de la región pampeana, sistemas de pronóstico (enfoque empírico y fundamental-empírico) de niveles epidémicos de la FET a partir de variables meteorológicas

Objetivo 2: identificar situaciones meteorológicas sinópticas asociadas a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET (estimados por sistema de pronóstico fundamental-empírico), en sitios de la región pampeana.

Objetivo 3: identificar predictores meteorológicos en la escala hemisférica asociados a la ocurrencia de niveles epidémicos de la FET (estimados por sistema de pronóstico empírico), en áreas homogéneas de la región pampeana.

CAPÍTULO I

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FUSARIOSIS DE LA ESPIGA DE TRIGO (FET)

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas de pronóstico de la fusariosis de la espiga de trigo (FET) es considerado clave para desarrollar múltiples aplicaciones que puedan integrarse al manejo táctico y estratégico de la enfermedad (Moschini *et al*., 2008 b). La naturaleza esporádica de la FET, asociada fuertemente al factor ambiental, ha estimulado su modelamiento matemático con el objetivo de desarrollar sistemas de pronóstico. Krause and Massie (1975) señalaron dos enfoques para construir estos pronósticos basados en variables meteorológicas: a) fundamental y b) empírico. En el enfoque fundamental, mediante cámaras u otras condiciones controladas, se evalúa el efecto térmico y la duración de mojado sobre la infección. En este marco, Andersen (1948) estableció los porcentajes de infección en espigas de trigo inoculadas artificialmente con conidios de *F. graminearum* ante distintas duraciones de mojado y temperaturas. El empírico, por su parte, surge del análisis de datos históricos de registros de enfermedad y condiciones ambientales en un área geográfica específica. Bajo este enfoque, en Pergamino (NE de la Región Pampeana de Argentina), se pudieron identificar los factores hídricos y térmicos asociados con la incidencia de la FET (porcentaje de espigas afectadas), cuantificando esta relación a través de una modelo bivariado (Moschini and Fortugno, 1996). La variable hídrica del modelo simula la duración de mojado de la espiga combinando, en períodos de dos días, la ocurrencia de precipitación y altos registros de humedad relativa. En el sur de la región pampeana (zona de Mar y Sierras), González Montaner (2004) explicó que decisiones de manejo sanitario del trigo son tomadas al verificarse al menos dos períodos hídricos definidos por el modelo desarrollado en Pergamino, complementado con valores promedio de humedad relativa, en los 10 días previos a antesis, superior a 70% y 80% para tigo candeal y pan respectivamente**.** En el sur de Brasil el modelo bivariado se utilizó para zonificar el riesgo de la FET, con el objeto de reconocer fechas de espigazón y regiones más favorables para la ocurrencia de epidemias (Zoldan, 2008 a). También con dicha ecuación fue posible, en la campaña 2003, identificar

satisfactoriamente situaciones diferenciales de riesgo y respuesta al control químico en el oeste de Uruguay (Mazzilli *et al.*, 2007). No obstante estas aseveraciones, debe señalarse que la ecuación desarrollada por Moschini and Fortugno (1996), además de no estimar la severidad de la FET (porcentaje de espiguillas enfermas en las espigas afectadas), tiene limitaciones para establecer paso a paso la evolución de la epidemia y evaluar la intensidad de cada evento infectivo, complicando la toma de decisión respecto a realizar un control químico. A través de un sistema con base meteorológica que combina elementos derivados del enfoque fundamental (estudios en ambiente controlado de Andersen, 1948) y empírico (ecuación), Moschini *et al.* (2002) estimaron satisfactoriamente la evolución del Índice de Fusarium (incidencia% x severidad%/ 100) a lo largo del período crítico del cultivo, en Marcos Juárez y Pergamino. Se definieron las relaciones funcionales entre la severidad de la enfermedad y las duraciones de mojado y temperaturas (enfoque fundamental) y entre el sustrato diario disponible para el patógeno (espigas con anteras expuestas) y un factor de acumulación térmica. A partir de registros diarios meteorológicos de estaciones convencionales (temperatura máxima y mínima, precipitación y humedad relativa), se establecieron las reglas de equivalencia (conclusiones derivadas del enfoque empírico) para definir la duración de mojado y temperatura a usar en la función de ajuste para la severidad. Este sistema predictivo fundamental-empírico permite cuantificar la evolución del proceso múltiple de infección (evento por evento). Ambos sistemas de pronóstico desarrollados en Argentina fueron validados y ajustados para otros sitios de la región pampeana (Moschini y Carmona, 1998; Moschini *et al*., 2001; Moschini *et al.*, 2004; Carranza *et al.*, 2007; Moschini *et al.*, 2008 a). Recientemente, Martínez (2009) desarrolló y validó un nuevo sistema de pronóstico del índice de Fusarium sobre la base del elaborado por Moschini *et al*. (2002), usando nueva información generada en ambiente controlado, con inoculaciones de conidios de *F. graminearum* provenientes de cepas del sur de la región pampeana.

De Wolf *et al.* (2002), basándose en datos meteorológicos, desarrollaron modelos de regresión logística para evaluar el riesgo de epidemias de la FET en tres regiones trigueras de Estados Unidos. Las variables predictoras son procesadas en un lapso de 17 días alrededor de la antesis del cultivo. En Bélgica, Detrixhe *et al.* (2003) definieron un modelo agrometeorológico para evaluar el riesgo de infección de la FET (escala regional: resolución 1 km x 1 km), simulando la duración del mojado foliar. Esta simulación está basada en la interpolación de datos meteorológicos (temperatura,

humedad relativa, velocidad del viento y radiación de onda corta y larga) colectados de una red de estaciones meteorológicas y de datos de radar para estimar la precipitación. Recientemente se desarrolló en Brasil un modelo de simulación del riesgo de infección de la FET (Del Ponte *et al*., 2005). En este trabajo los autores estimaron el índice de infección de la FET en base a la dinámica de la floración, densidad de inóculo y frecuencia de infección. Esta última resultó una función de la temperatura durante un evento infectivo, el cual se estableció combinando registros de precipitación y humedad relativa, en forma muy similar a lo definido por Moschini *et al*. (2002).

El objetivo de este capítulo fue desarrollar y validar sistemas de pronóstico (enfoque empírico y fundamental-empírico) de niveles epidémicos de la FET a partir de variables meteorológicas. La disponibilidad de dichos sistemas predictivos, validados en distintos sitios de la región pampeana, permitió derivar los estudios posteriores en la escala sinóptica y hemisférica en relación a la enfermedad. Se describirán seguidamente aspectos relevantes de trabajos publicados referidos a la temática de desarrollo y validación (objetivo del capítulo I) de sistemas de pronóstico de la FET

2 DESARROLLO DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FET

2-1 Enfoque Empírico: sistema de pronóstico de la incidencia de la FET (Pergamino)

El objetivo de esta sección (Moschini and Fortugno, 1996) fue identificar y cuantificar el efecto de variables meteorológicas sobre la incidencia de la FET en un sitio de la región pampeana .

Materiales y Métodos

Las observaciones de incidencia de la FET (porcentaje de espigas afectadas por parcela) se obtuvieron de la Red Oficial de Ensayos Territoriales (ROET) y de ensayos regionales internos (ERI) conducidos en la estación experimental del INTA Pergamino (latitud, 33° 56' S; longitud, 60° 33' W). El conjunto final de valores observados de incidencia (N=22) para el periodo 1978-1990 (años sin datos: 1981, 1988 y 1989) fue definido después de agrupar las variedades (más de ocho variedades por grupo) en función de sus fechas de espigazón (desvío respecto a una fecha media de espigazón: +/- 2 días). Plena espigazón fue registrada cuando el 50% de las espigas de cada parcela estuvieron completamente emergidas, etapa equivalente a GS 55 (Zadoks *et al.*, 1974).

A partir de los valores de incidencia registrados para las variedades de cada grupo seleccionado, se calculó la incidencia de la enfermedad porcentual promedio.

Las numerosas variables hídricas (ligadas a la precipitación y a la humedad relativa, individualmente y combinadas) y térmicas analizadas se procesaron a partir de registros diarios de temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn), humedad relativa (HR: promedio de las observaciones de las 9, 15 y 21 h) y precipitación (Pr), medidos en el observatorio convencional de la EEA INTA Pergamino. Con los datos de incidencia de la FET de Pergamino usados por Moschini and Fortugno (1996), Moschini *et al*. (2008) analizaron nuevas variables meteorológicas reemplazando los registros de HR por los de amplitud térmica (AT= *Tx – Tn*), para combinar con la ocurrencia de precipitación.

Para evaluar la asociación entre la información ambiental y la epidémica se desarrolló un programa con el lenguaje de paquete SAS. Se analizaron varias longitudes del período crítico para la infección de la FET (PCI), coincidente con el lapso con disponibilidad de anteras expuestas. Los PCI analizados tuvieron inicios que ocilaron en +/- 8 días respecto a la fecha de plena espigazón del trigo y finalizaron al alcanzarse distintas acumulaciones de grados días (se acumulan las temperaturas medias diarias mayores a 0°C). Se seleccionó la longitud del PCI, en el cual se calculan las variables meteorológicas, que logró maximizar los coeficientes de determinación (R^2) de las relaciones simples entre dichas variables y la incidencia de la FET (rutina Rsquare del SAS). La evaluación de la habilidad predictiva y selección final de los modelos de regresión se basó, además del significado biológico, en los siguientes criterios: máximo R^2, mínimo valor del error cuadrático medio (ECM: calculado como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los 22 desvíos entre los valores observados de incidencia de la FET y los predichos) y por la definición del procedimiento Stepwise (Proc REG del SAS). Esta última técnica de selección agrega una por una las variables regresoras al modelo, incorporando a cada paso aquel factor que logra el mayor ajuste del modelo. En pasos sucesivos, las variables ya incluidas en la ecuación pueden ser removidas. En los test de F parcial que realiza el proceso, se dan opciones para establecer los niveles de significancia requeridos para que una variable sea incorporada (NSI) y permanezca (NSP) en el modelo.

Resultados

Las más fuertes asociaciones entre la incidencia de la FET y las variables meteorológicas ($>R^2$) se identificaron en el PCI que se inicia 8 días antes de la fecha de plena espigazón y finaliza cuando se completa una acumulación térmica de 530 grados

días. Para las 22 observaciones analizadas, la longitud del PCI en el cual se procesaron las variables osciló entre 26 y 32 días. La ecuación I-1 bivariada resultó la más apropiada para estimar el porcenaje de espigas afectadas o incidencia de la FET (IncFETP%) de acuerdo al procedimiento Stepwise, coincidentemente presentó el menor error de predicción y el más elevado coeficiente de determinación.

$$\mathbf{IncFETP(\%)=20,37 + 8,63\ NP2 - 0,49\ GDN} \qquad R^2=0,86 \qquad \text{I-1}$$

donde NP2: número de períodos de 2 días con registro simultáneo de precipitación (≥ 0.2 mm) y HR>81% (día 1) y una HR>= 78% (día 2) (R^2=0,81); GDN resulta de sumar GDTx y GDTn, las cuales son calculadas por el siguiente procedimiento:

si Tx>26°C entonces GDTx= $\sum^d$ (Tx-26)

si Tn<9°C entonces GDTn= $\sum^d$(9-Tn), siendo d=días del PCI.

Largos períodos de mojado en anteras (24-72 h) favorecen la infección del patógeno. El hecho de no disponer de registros directos de la duración del mojado generado por precipitación, forzó a su estimación de una manera indirecta combinando la ocurrencia simultánea diaria de lluvia con altos registros de humedad relativa del aire, en períodos de dos días (variable NP2). Por otra parte debe señalarse la baja correlación encontrada entre la frecuencia de precipitación y la incidencia de la FET (R^2=0,17). Moschini *et al*. (2008**)** identificaron una variable hídrica independiente que combina la ocurrencia de precipitación con la amplitud térmica del día (AT=Tx-Tn), no demandando registros de HR. El mejor modelo bivariado seleccionado fue:

$$\mathbf{IncFETP(\%)= - 9,15 + 6,47\ ND + 0,35\ GDP} \qquad R^2=0,81 \qquad \text{I-2}$$

donde *ND*: número de días con ocurrencia simultánea de precipitación y AT<7°C (R^2=0,76); GDP: resulta de acumular los residuales >9°C en Tn en los días donde Tx<25°C y Tn>=9°C.

2-2 Enfoque Fundamental – Empírico: desarrollo de sistema de pronóstico del Índice de Fusarium (Pergamino-Marcos Juárez)

El objetivo de esta sección (Fuente: Moschini *et al*., 2002) fue estimar la evolución del índice de Fusarium a lo largo del período crítico del trigo para la infección, a través de un sistema con base meteorológica que combina elementos derivados de los enfoques fundamental y empírico, en dos sitios de la región pampeana.

Materiales y Métodos

- Índice de Fusarium observado (IndFO %). Surge de multiplicar la incidencia (porcentaje de espigas afectadas) por la severidad (porcentaje de espiguillas enfermas en las espigas afectadas) observadas, dividido 100. Se analizaron 84 valores de IndFO%, registrados en 30 cultivares comerciales de reacción susceptible (s) y en 54 moderadamente susceptible (ms) en los años 1985, 86, 87, 90, 91, 93, 94 (INTA Pergamino) y en 1993, 97, 2000 y 2001 en INTA Marcos Juárez.

- Índice de Fusarium predicho (IndFP %)

a) Cálculo del progreso diario del porcentaje de espigas con anteras expuestas (%EspAnt): se generalizaron las conclusiones hechas en un lote de trigo Klein Volcán (INTA Castelar, año 2000), donde se evaluó la evolución de la espigazón (%Esp: porcentaje de espigas emergidas) y de la antesis (%EspAnt). Se ajustó una función polinómica (Proc GLM, SAS, 1988) entre el logit de la proporción de espigas con anteras (EspAnt, valores de 0 a 1) y el tiempo dado en grados día (GD: acumulación diaria de las temperaturas medias >= a 12°C, R^2=0,9552, n=14).

$$LogitAnt = -6{,}765052912 + 0{,}136395967 * GD - 0{,}000694621 * GD^2 + 0{,}000001384 * GD^3 - 0{,}000000001 * GD^4 \quad \text{I-3}$$

donde LogitAnt es el logaritmo natural de (EspAnt / 1- EspAnt). El %EspAnt se obtuvo resolviendo: (EXP(LogitAnt) / (1+EXP(LogitAnt)) * 100. El progreso diario del %EspAnt se empezó a estimar 4 días antes de la fecha de plena espigazón observada en cada uno de los 84 registros de IndFO y finalizó cuando se acumularon 530 GD. Este lapso constituye el período crítico de infección de la FET (PCI).

b**)** Cálculo de la severidad predicha (SevP%): Andersen (1948), en ambiente controlado, estableció los porcentajes de infección (Sev%) en espigas de trigo inoculadas artificialmente con conidios de *Fusarium graminearum* ante distintas duraciones de mojado (DM=18 h a 72 h) y temperaturas (T=15, 20, 25 y 30°C). A estos valores tabulados se ajustó una función polinómica (Proc GLM, SAS, 1988) entre el logit de la severidad (Sev, valores de 0 a 1) con la DM en horas y la T en °C, como efectos individuales e interactivos (R^2=0,966, n=24).

$$LogitSev = 38{,}77166158 - 0{,}53815698 * DM - 6{,}02985565 * T + 0{,}26849793 * T^2 - 0{,}00396097 * T^3 + 0{,}04990941 * IT - 0{,}00092343 * IT^2 \quad \text{I-4}$$

LogitSev: logaritmo natural de (Sev/1-Sev); T^2=T*T; T^3=T^2*T; IT=T*DM; IT^2=T^2*DM. La SevP% surge resolviendo EXP(LogitSev) / (1+EXP(LogitSev))* 100.

Para identificar eventos infectivos de la FET (períodos de mojado de 24 a 72 h) y cuantificar su severidad (ecuación I-4), se debieron establecer reglas de equivalencias

para definir las DM y T medias en los lapsos de mojado a partir de registros diarios de Pr, Tx, Tn y HR provenientes de los observatorios agrometeorológicos de las EEA INTA Pergamino y M. Juárez. Para ello se usaron criterios del enfoque empírico de estimación de la incidencia de la FET (Moschini and Fortugno, 1996). A lo largo del PCI se definió que:

1 día con Pr (>=0,2mm) y HR>= 81% equivale a una_____ DM=24 h

2 días consecutivos con Pr y HR >= 81%_____ DM=48 h

3 días consecutivos con Pr y HR >=81% _____DM=72 h

La máxima DM que se analizó fue de 72 h. Si a DM de 24 y 48 h le preceden o suceden: Pr y HR<=77 % o suceden HR>77, se agregan 3 h de mojado. Se agregan 6 h con Pr y HR >77% y <81% (previo o post). La temperatura en los períodos de mojado resultó del promediar las temperaturas medias diarias (td= Tx+Tn / 2), ponderado por las horas de mojado de cada día involucrado. Con temperaturas < a 15°C sólo se calculan los porcentajes de infección en DM >= a 48 h.

Recientemente, Moschini *et al.* (2008) desarrollaron y validaron este mismo sistema de pronóstico fundamental-empírico del Índice de Fusarium, con la diferencia que establecieron relaciones de equivalencia para estimar la duración de mojado en función de la amplitud térmica (AT: del enfoque empírico): se definió que: 1 día con Pr (>=0,2mm) y AT<7 °C equivale a una DM=24 h; 2 días consecutivos con Pr y AT<7 °C equivalen a una DM=48 h; 3 días con Pr y AT<7°C equivalen a una DM=72 h. La máxima DM que se analiza es de 72 h. Si a DM de 24 y 48 h le preceden o suceden: Pr y AT>=7,5°C o suceden AT<7.5°C, se agregan 3 h de mojado. Se agregan 6 h con Pr y AT<7,5°C y >=7°C (previo o post).

c) El Indice de Fusarium predicho final (IndFP%) surge de sumar los productos (%EspAnt*SevP%)/ 100 calculados para todos eventos infectivos (períodos de mojado de 24 a 72 h) hallados a lo largo del período crítico para la infección (PCI). Este análisis se realizó para cada PCI definido en correspondencia a cada una de las fechas de espigazón de las 84 variedades de trigo con observaciones de IndFO:

$$IndFP\% = \sum^{n} (\%EspAnt * SevP\%) \ / \ 100 \qquad \text{I-5}$$

siendo n el número total de períodos de mojado infectivos registrados a lo largo del PCI.

La correspondencia entre los Indices de Fusarium observados (IndFO%) en 54 cultivares de trigo moderadamente susceptibles y 30 susceptibles versus los predichos (IndFP%) en Marcos Juárez y Pergamino (84 pares de valores), se analizó graficando los puntos que relacionan ambos valores en torno a la recta 1 a 1 (perfecta correspondencia) y por el test de "t" de observaciones apareadas (Proc Mean) (SAS, 1988).

Resultados

El gráfico de dispersión de los puntos que relacionan los valores de Indice de Fusarium observados (IndFO%) versus los predichos (IndFP%), mostró un satisfactorio ajuste respecto a la recta 1:1 (Figura I-1). Profundizando el análisis se observó una ligera tendencia a la sobreestimación en los cultivares moderadamente susceptibles (ms) (53,7% de los 54 desvíos IndFO-IndFP fueron negativos) y una más acentuada a la subestimación en los cultivares susceptibles (s) (60% de los 30 desvíos fueron positivos). Para observaciones apareadas, un valor de "t" calculado de 0,156 entró en la zona de no rechazo de la hipótesis nula de que la media de las diferencias IndFO-IndFP es igual a 0 (Prob>|t|=0,876).

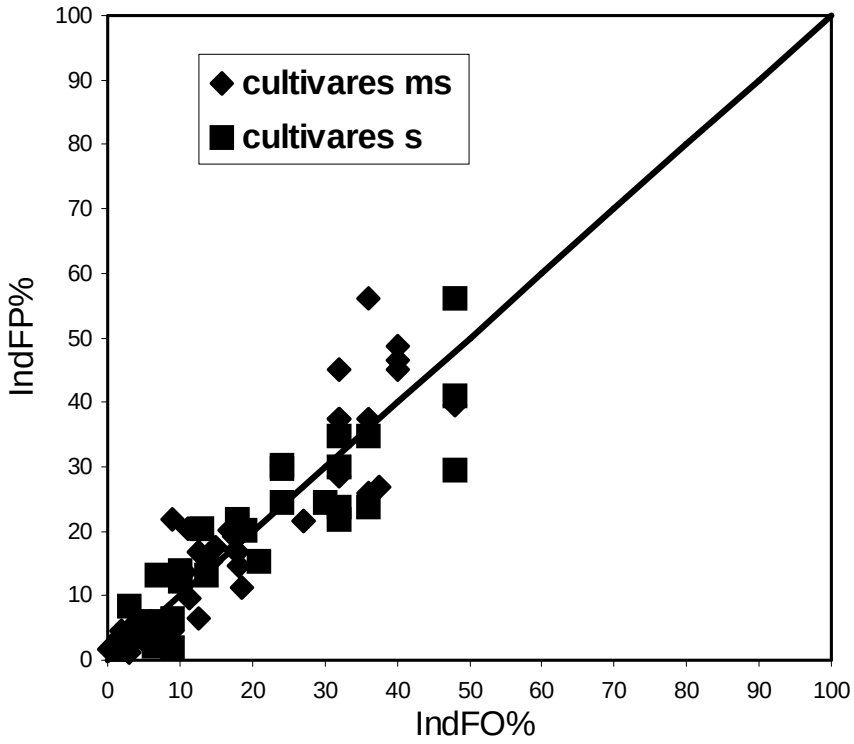

Figura I-1. Indices de Fusarium observados (IndFO%) versus los predichos (IndFP%) respecto a la recta 1:1, para 54 cultivares de trigo moderadamente susceptibles (ms) y 30 susceptibles (s) (N total=84) en Marcos Juárez y Pergamino.

3 VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE LA FET

3-1 Sitio: Pergamino

La primera validación de la ecuación I-1 fue realizada utilizando datos independientes de incidencia observada de la FET (IncFETO%) en Pergamino, para tres campañas trigueras (1991 a 1993) (Moschini and Fortugno, 1996).

Tabla I-1. Comparación entre la incidencia de la FET predicha (IncFETP%) por la ecuación I-1 y la incidencia observada media (IncFETO%) calculada a partir de los valores registrados por los cultivares de trigo agrupados por similar fecha de espigazón

Año	*Fecha de Espigazón*	*IncFETP %*	*IncFETO %*
1991	16/10	29	29
1991	24/10	27	22
1992	18/10	0	0
1993	25/10	72	78
1993	31/10	45	48

Ecuación I-1: IncFETP(%)=20,37 + 8,63 NP2 - 0,49 GDN; donde NP2: número de períodos de 2 días con registro simultáneo de precipitación (≥ 0.2 mm) y HR>81% (día 1) y una HR>=78 % (día 2); GDN: GDN resulta de sumar GDTx y GDTn, las cuales son calculadas por el siguiente procedimiento: si Tx>26°C entonces GDTx= $\sum^{d}$ (Tx-26); si Tn<9°C entonces GDTn= $\sum^{d}$(9-Tn), siendo d=días del PCI.

La validación de las predicciones de la ecuación I-1 con observaciones de incidencia de la FET registradas en Pergamino, pero en campañas que no participaron en el desarrollo del modelo, resultó muy satisfactoria (Tabla I-1).

3-2 Sitios al norte de Pergamino

3-2-1 Sitios : Zavalla y Oliveros

Los valores de incidencia de la FET predichos (IncFETP%) mediante la ecuación I-1 fueron validados con datos de incidencia observados en cultivares moderadamente susceptibles y susceptibles en dos sitios al norte de Pergamino: Zavalla (Lat. 33° 1´ S) y Oliveros (Lat. 32° 33´S) (Moschini *et al.*, 2001). Como resultado de este estudio realizado en las campañas trigueras 1993, 1994 y 1995, se detectó una

tendencia a subestimar los niveles de incidencia de la enfermedad en los años epidémicos severos. Este error de predicción fue drásticamente reducido, cambiando el umbral de la temperatura máxima de la variable térmica (GDN) de la ecuación I-1 (nuevo umbral: 30°C en lugar de 26°C), como se muestra en la tabla I-2.

Tabla I-2. Comparación de la incidencia de la FET predicha (IncFETP%) mediante la ecuación I-1 modificada (umbral Tx: 30°C) y la observada (IncFETO%) en cultivares de trigo moderadamente susceptibles a susceptibles, en 1993-1995. D.E.: desvío estandar (entre paréntesis se detalla el número de muestras observadas por año y sitio)

Año	*Sitio*	*Fecha de Espigazón*	*IncFETP%*	*IncFETO%.*	*D.E.*
1993	Oliveros	10/28	70.5	83.0	8.2 (10)
1994		10/13	60.7	57.7	20.4 (9)
1995		10/5	14.3	21.4	15.1 (28)
1993	Zavalla	10/28	86.6	91.1	10.5 (9)
1994		10/17	52.6	43.3	15.8 (5)
1995		10/4	32.2	46.7	5.8 (3)

Ecuación I-1 modificada:IncFETP*%=20.37+8.63* ***NP2*** *- 0.49 GDN***,** en la cual GDN representa la acumulación de los residuales que resultan de restar 9 a Tn (<9°C) y la cantidad que excede a 30 °C en Tx.

3-2-2 Sitio: Oliveros

Incidencia (IncFETO%) e Índice de Fusarium observados (IndFO%): la incidencia (porcentaje de espigas afectadas) y severidad (porcentaje de espiguillas afectadas en las espigas enfermas) de la FET fueron registrados (dos repeticiones) en cultivares comerciales de trigo, sembrados en la EEA INTA Oliveros, en la campaña 2007/2008 (Moschini *et al.*, 2008). El IndFO% resultó de multiplicar la incidencia por severidad, dividido 100. Los cultivares fueron agrupados por similar fecha de espigazón (FEsp +/- 1 día). Se calculó la mediana de los valores observados de enfermedad mayores y menores de las dos repeticiones, por agrupamiento (cuatro grupos con cinco, nueve, 14 y siete cultivares) (Tabla I-3).

Incidencia Predicha (IncFETP%) (enfoque empírico): a) Ecuación I-1 b) Ecuación I-2. Las variables meteorológicas de ambas ecuaciones se procesaron en un período crítico para la infección (PCI) que se inicia 8 días antes de la fecha de plena espigazón (coincidente con la emergencia de primeras espigas con anteras a nivel de lote) y finaliza cuando se acumulan 530 grados día (Tabla I-3).

Indice de Fusarium predicho (IndFP%) (enfoque fundamental-empírico)

(Moschini *et al.*, 2002). Cambios menores fueron incorporados a la metodología precedente. El PCI se inicia 8 días previos a la plena espigazón y finaliza cuando 530 GD fueron acumulados (se acumulan las temperaturas medias>=12°C). Si la duración de mojado (DM) es <48 h y T oscila entre 15°C y 13,5°C, solo se considera el 90 % del valor del índice de Fusarium calculado para una DM=48 h. En las reglas de equivalencia el umbral HR>=81% original fue reemplazado por HR>81% (Tabla I-3). Para estimar la duración de mojado en función de la amplitud térmica (AT: del enfoque empírico): se definió que: 1 día con Pr (>=0,2mm) y AT<7°C equivale a una DM=24 h; 2 días consecutivos con Pr y AT<7 °C equivale a DM=48 h; 3 días con Pr y AT<7°C equivale a DM=72 h. La máxima DM que se analiza es de 72 h. Si a DM de 24 y 48 h le preceden o suceden: Pr y AT>=7,5°C o suceden AT<7.5°C, se agregan 3 h de mojado. Se agregan 6 h con Pr y AT<7,5°C y >=7°C (previo o post).

Para las FEsp más tempranas, las incidencias de la FET estimadas por la ecuación original con HR (I-1) sobrestimaron levemente a la mediana de los valores observados, en cambio las predicciones del Índice de Fusarium (Fundamental-empírico original con HR) reflejaron satisfactoriamente los altos valores observados. Gradualmente, los cultivares más tardíos escaparon a las condiciones meteorológicas favorables para el patógeno de principios de octubre, siendo sólo afectados por dos eventos infectivos (FEsp=17/10). La señalada tendencia a la sobreestimación de la incidencia de la FET decreció cuando se utilizó la ecuación I-2 con AT. El sistema fundamental-empírico con AT se comportó satisfactoriamente (Tabla I-3).

Tabla I-3. Mediana de los valores de incidencia de la FET e índices de Fusarium observados (IncFETO% e IndFO%: Mayores y Menores) y predichos (IncFETP%: Ec.I-1 y Ec. I-2; IndFP%: con HR y con AT). Sitio: Oliveros (2007/08). Fecha de espigazón (FEsp +/-1 día) en torno a la cual se agrupan los cultivares de trigo por muestra.

FEsp	**Muestra**	***IncFETO***		***IncFETP***		***IndFO***		***IndFP***	
		Mayor	*Menor*	*Ec I-1*	*Ec I-2*	*Mayor*	*Menor*	*ConHR*	*ConAT*
(+/- 1d)	N°	Mediana (%)				Mediana (%)			
6/10	5	52,4	34,6	55,5	43,0	16,9	5,7	10,3	7,4
9/10	9	35,5	16,7	53,8	43,0	5,5	2,4	5,6	3,8
17/10	14	26,6	9,9	30,7	29,9	3,0	0,85	0,8	0,8
20/10	7	12,8	11,5	10,0	12,1	2,3	1,1	0,7	0,7

Ec. I-1: IncFETP(%)=20,37+8,63 NP2-0,49 GDN; donde NP2: n° de períodos de 2 días con registro simultáneo de precipitación (≥0.2 mm) y HR>81% (día 1) y HR>=78% (día 2); GDN: resulta de sumar GDTx y GDTn, las cuales son calculadas de la siguiente forma: si Tx>26°C entonces GDTx=$\sum^{d}$(Tx-26); si Tn<9°C entonces GDTn=$\sum^{d}$(9-Tn).

Ec. I-2: IncFETP(%)=- 9,15+6,47 ND+0,35 GDP; donde *ND*: n° de días con ocurrencia de precipitación y AT<7°C; GDP: se acumulan los residuales >9°C en Tn en los días donde Tx<25°C y Tn>=9°C.

3-3 Sitios al Sur de Pergamino

3-3-1 Sitio: Balcarce

Valores medios porcentuales de incidencia de la FET (1986-1997) calculados a partir de observaciones de la enfermedad en cultivares de trigo agrupados por fechas de espigazón similares, fueron usados para validar los predichos por la ecuación I-1 en Balcarce (Lat.37° 45' S) (Moschini y Carmona, 1998).

De acuerdo a la tabla I-4, se obtuvo una estrecha concordancia entre la incidencia de la FET observada y predicha, modificando los umbrales de la variable térmica de la ecuación I-1. El umbral de Tx pasó de 26°C a 30°C y el de Tn se reemplazó por 11°C. También se redujo el período crítico para la infección (PCI). Las variables fueron procesadas en el PCI que se inicia 8 días previos a la fecha de espigazón y finaliza al acumularse 450 grados día (temperatura base: 0°C) (26 a 31 días).

Tabla I-4. Comparación de la incidencia predicha de la FET (IncFETP%) por ecuación I-1 modificada (umbral Tx: 30°C; umbral Tn: 11°C) y la observada (IncFETO%) (media de valores observados en cultivares de trigo) en 1986-1997, en Balcarce.

Año	*Fecha de espigazón*	*IncFETP %*	*IncFETO %*
1986	31/10	41,1	43
1987	29/10	20,4	15
1988	9/11	0	7
1989	1/11	0	0
1990	1/11	0	7,1
1991	5/11	42,7	39,2
1992	8/11	26,9	26,6
1993	25/10	13,9	13,8
1994	6/11	6,3	1
1995	15/11	9,5	9,4
1996	25/10	30,7	32,5
1997	7/11	16,5	8,4

Ec I-1 modificada: ***IncFETP****%=20,37 + 8,63* ***NP2*** *– 0,49 GDN* **,** donde GDN representa la acumulación de los residuales que resultan de restar 11 a Tn (<11°C) y la cantidad que excede a 30 °C en Tx. PCI: 8 días previos a fecha de espigazón hasta acumular 450 grados día.

3-3-2 Sitios: La Dulce, Miramar y Balcarce

Los valores observados de incidencia, severidad e índice de Fusarium en La Dulce, (Lat. 38° 10' S, Long 58° 00' W), Miramar (Lat. 38° 00' S, Long. 57° 33' W) y

Balcarce (Lat. 37° 45’ S; Long 58° 18W), para la campaña 2001/02, son detallados en la tabla I-5 (Moschini *et al*., 2004).

Tabla I-5. Valores observados de Incidencia de la FET (IncFETO%), severidad (SevFETO% e Indice de Fusarium (media de los registros observados en cultivares de trigo agrupados por similar fecha de espigazón).

Sitio	**IncFETO**	**SevFETO**	**Indice de Fusarium**	**Fecha Espigazón**	**Muestras**
	Media	Media	Media		
	%	%	%		N°
La Dulce	38,1	10,6	4,0	31/10	12
Miramar	36,0	10,2	3,7	4/11	9
Balcarce	42,5	10,4	4,4	5/11	7

Incidencia Predicha (IncFETP%) (enfoque empírico)**:** la ecuación I-1 desarrollada en Pergamino fue usada para predecir la incidencia de la FET, bajo las condiciones meteorológicas de La Dulce, Miramar y Balcarce. De acuerdo a la Tabla I-6, con PCI de 530 GD, aún cuando se obtuvieron desvíos parciales menores (excepto La Dulce), predominó una tendencia a la subestimación (mayor número de desvíos positivos). Cambiando el PCI de 530 a 450 GD, los desvíos entre la incidencia observada y los predichos por la ecuación I-1 mostraron los menores valores absolutos y balance en sus signos. También se produjo una disminución significativa en el desvío medio.

Índice de Fusarium predicho (IndFP%) (enfoque fundamental-empírico): en este estudio de validación se incorporaron cambios menores a la metodología desarrollada por Moschini *et al.* (2002). El PCI fue definido como el lapso que se inicia 8 días previos a la plena espigazón y finaliza al acumularse 450 GD (se suman las temperaturas medias >= 10°C). Si el período de mojado es menor a 48 h y T oscila entre 15°C y 13,5°C, sólo se considera el 90 % del valor del índice de Fusarium calculado para un mojado de 48 h. La aptitud del sistema fundamental-empírico para predecir el índice de Fusarium fue confirmado por la ausencia de diferencias significativas entre los niveles predichos y observados (Tabla I-7), no obstante la pequeña sobreestimación observada.

Tabla I-6. Desvíos (por sitio y medio) entre la incidencia de la FET observada (IncFETO%) y la predicha (IncFETP%) por la ecuación I-1, para dos períodos críticos para la infección (PCI: 530 GD y 450 GD) en La Dulce, Miramar y Balcarce (2001).

Sitio	PCI= 530 GD Desvío IncFETO - IncFETP Ec.I-1	PCI= 450 GD Desvío IncFETO - IncFETP Ec I-1
	%	%
La Dulce	16,1	11,7
Miramar	6,5	1,0
Balcarce	2,8	-0,3
Desvío medio	8,4	4,1
Media observada	38,8	38,8
Media predicha	30,4	34,7

Tabla I-7. Desvíos (por sitio y medio) entre el índice de Fusarium observado y predicho por el sistema fundamental-empírico. Índices de Fusarium extremos observados en los cultivares de trigo incluidos en las muestras por sitio versus los predichos (pie de tabla)

Sitio	Desvío Observado – Predicho	Indices de Fusarium extremos Observado		Predicho*	
	%		%		
La Dulce	1,3	2,8	6,0	3,9	6,4
Miramar	0,9	2,0	6,1	4,0	6,5
Balcarce	0,8	2,7	7,1	4,7	7,2
Desvío Medio	1,0				
Media observada	4,0				
Media predicha	3,0				

***** Indice de Fusarium extremo predicho (IndFP) fue calculado por las siguientes ecuaciones: a) IndFPms=1,5859+0,8588*IndFP b) IndFPs=4,0914+0,8588*IndFP para cultivares moderadamente susceptibles (ms) y susceptibles (s) (Moschini *et al.*, 2002)

3-3-3 Sitios: Balcarce y Barrow

Observaciones de incidencia y severidad de la FET fueron realizadas (escala original: 0 a 9, transformada a porcentaje) para varios cultivares de trigo en dos sitios del sur de la región pampeana: Balcarce (37° 45’ S; 58° 18W) y Barrow (38° 19’, 60° 15’) en las campañas 2002 y 2003 y sólo en Balcarce en 2004. Valores observados del índice de Fusarium resultaron de multiplicar la incidencia por la severidad, dividido por 100. Para los cultivares agrupados por fechas de plena espigazón similares (fecha

espigazón +/- 1 día) se calculó el valor de la mediana de los niveles de enfermedad observados, por sitio y campaña triguera analizada, (Tabla I-8).

Tabla I-8. Mediana de los valores incidencia de la FET observados (IncFETO%) y del Índice de Fusarium (IndFO%) en Balcarce y Barrow, para las campañas 2002-2004

	IncFETO	IndFO	Fecha de Plena Espigazón	Muestras
	%	%		No,
Balcarce				
2002	27,5	13,3	1/11	14
2003	5,5	1,2	4/11	12
2004	22,0	7,3	31/10	12
Barrow				
2002	19,0	9,8	1/11	14
2003	0	0	4/11	12

Incidencia de FET Predicha (IncFETP%) (enfoque empírico): para el presente trabajo se utilizó la ecuación I-1 (Moschini and Fortugno, 1996), con las modificaciones consideradas por Moschini y Carmona (1998), para sitios del sur de la región pampeana (umbrales 30°C y 11°C para Tx y Tn respectivamente y PCI de 450 GD) (Tabla I-9).

Índice de Fusarium predicho (IndFP%) (enfoque fundamental-empírico): para este estudio se llevaron a cabo pequeños cambios en la metodología propuesta por Moschini *et al.* (2002) y otros considerados por Moschini *et al.* (2004). El PCI fue definido como el lapso que se inicia 4 días previos a la plena espigazón y finaliza cuando 450 GD fueron acumulados (se acumulan las temperaturas medias>=10°C). Si el período de mojado es menor a 48 h y T es menor a 15°C, sólo se considera el 90% del valor del índice de Fusarium calculado para un mojado de 48 h (Tabla I-9).

Sitios más fríos que Pergamino, tal como Balcarce y Barrow, respondieron fuertemente a la reducción en la longitud (expresado en grados día) del PCI, mostrando mayor precisión en las predicciones de incidencia a partir de la ecuación I-1. Respecto al enfoque fundamental-empírico, la previa longitud del PCI (530 GD de temperaturas medias diarias >=12°C) resultó excesivamente larga para ambos sitios más fríos (38 a 41 días), a diferencia del nuevo PCI (450 GD de temperatura media diaria >=10°C). A diferencia de lo observado por Moschini *et al.* (2004) para la campaña 2001, los valores del índice de Fusarium estimados para cultivares de trigo susceptibles o moderadamente

susceptibles no igualaron el muy amplio rango de enfermedad observado por los cultivares comerciales durante la epidemia más severa de la campaña 2002 (Tabla I-9).

Tabla I-9. Desvíos (por sitio-año y medio) entre los valores observados de incidencia de la FET (IncFETO%) e índice de Fusarium (IndFO%) y aquellos predichos por la ecuación I-1 modificada y por el sistema fundamental-empírico, en Balcarce y Barrow para las campañas 2002-2004. Índices de Fusarium extremos observados en los cultivares de trigo incluidos en las muestras por sitio-año versus los predichos (pie de Tabla)

	Desvío		**Índice de Fusarium extremo***			
	IncFETO - IncFETP	IndFO - IndFP	Observado		Predicho	
	%		%			
Balcarce						
2002	-14,0	-2,8	3,6	33,9	15,4	17,9
2003	5,5	-1,9	0,0	3,6	4,2	6,7
2004	-1,7	3,8	2,4	12,1	4,6	7,1
Barrow						
2002	-3,5	5,0	0,0	49,0	5,7	8,2
2003	0,0	-1,9	0,0	0,0	3,2	5,7
Media	2,7	0,4				

* Índice de Fusarium extremo predicho: fue calculado por las siguientes ecuaciones: a) IndFPms=1,5859+0,8588 IndFP b) IndFPs = 4,0914 + 0,8588 IndFP, para cultivares moderadamente susceptibles (ms) y susceptibles (s) (Moschini *et al*,, 2002). *Ec. I-1 modificada:* ***IncFETP****%=20,37 + 8,63* ***NP2*** *– 0,49 GDN* **,** donde GDN representa la acumulación de los residuales que resultan de restar 11 a Tn (<11°C) y la cantidad que excede a 30°C en Tx. PCI: 8 días previos a fecha de espigazón hasta acumular 450 grados día.

4 DISCUSIÓN

La simpleza de las ecuaciones predictivas de la incidencia de FET desarrolladas bajo el enfoque empírico constituye un elemento remarcable. Dado que por definición lo empírico resulta de difícil extrapolación, fueron numerosas las validaciones realizadas de los valores predichos con datos observados de incidencia, para sitios alejados de Pergamino, donde se realizó el desarrollo inicial. Pequeños cambios en los umbrales de temperaturas máximas y mínimas de la variable térmica de la ecuación I-1 y la reducción de los grados día que definen el período susceptible a la infección (sur de la región pampeana), fueron suficientes para lograr una validación satisfactoria. Para el sector NE de la región pampeana, la distribución espacial anual de niveles de

incidencia de la FET (estimados por ecuación I-1 y ajustes) permitió visualizar correctamente (validación semi cuantitativa) antes de la cosecha, la severa epidemia del 2001, la ligera a nula en 2006 y la moderada en los trigos con espigazón temprana en el 2007. En el sur, acertadamente se estimaron incidencias de la FET casi nulas en las campañas 2003, 2006 y 2007 (Moschini, 2004; Moschini and Bischoff, 2007; Moschini *et al.*, 2008 b).

Si bien la FET es una enfermedad monocíclica (inóculo: ascosporas de los peritecios del hongo en los restos culturales), la severidad acumulada final resulta de infecciones múltiples ocurridas a partir de varios episodios de inoculación durante el período crítico del trigo (Francl *et al.*, 1999). Las infecciones establecidas no pueden ser revertidas con los fungicidas usados actualmente (principalmente bencimidazoles y triazoles o sus mezclas), razón por la cual, las aplicaciones deben realizarse en forma preventiva (antes que ocurran) o semi-preventivas (máximo 2 a 3 días posteriores al evento infectivo). En este último caso pueden ocurrir limitaciones de "piso" para que opere una máquina aplicadora terrestre, normalmente más eficiente que los tratamientos con aviones (Annone, 2003). Las ecuaciones predictivas de la incidencia de la FET, además de no estimar la severidad de la FET, tienen limitaciones para establecer paso a paso la evolución de la epidemia y evaluar la intensidad de cada evento infectivo, complicando la toma de decisión respecto a un potencial control químico. El sistema de pronóstico fundamental-empírico permite cuantificar la evolución del proceso múltiple de infección (evento por evento). Para el lapso previo a cada evento infectivo, se esclarece la potencial acción sobre el Índice de Fusarium de una situación meteorológica pronosticada. Post inoculación, pero antes de la visualización de síntomas, se podrá realizar un control químico inmediato en función del valor acumulado del Índice de Fusarium y de la intensidad del último evento infectivo analizado. En las validaciones de las predicciones del sistema fundamental empírico para el sur de la región pampeana, un ajuste satisfactorio se logró con un nuevo período crítico para la infección, definido como el lapso que se inicia 4 días previos a la plena espigazón y finaliza cuando 450 GD fueron acumulados (se acumulan las temperaturas medias >=10°C).

Debido a la variabilidad intrínseca que acompaña a la definición de cada componente del tetraedro epidémico, debe señalarse la ausencia de precisión matemática en las estimaciones de ambos sistemas predictivos de la FET. Así por

ejemplo, en relación a la patometría, frecuentemente se encuentra que múltiples valores de incidencia de la FET observados en un lote, para un cultivar y campaña agrícola determinados, significan una alta variabilidad (Tabla I-2: desvíos de hasta 20%), complicando el contraste con valores predichos. También en trabajos recientes en cámara con inoculación artificial se han encontrado que las cepas de Fusarium utilizadas manifiestan mayor agresividad y adaptación a temperaturas inferiores (Zoldan, 2008 b; Martínez, 2009), en relación al estudio de Andersen (1948), sobre el cual se basó el cálculo de severidad de la FET en el enfoque fundamental-empírico. Respecto al hospedante, se ha indicado que el trigo es susceptible a la enfermedad desde antesis hasta grano pastoso suave, debido a la presencia de anteras senescentes semi-expuestas entre las glumelas, luego de la polinización (McMullen *et al.*, 1997). Este periodo critico para la infección es muy variable entre cultivares por las características de sus espigas y entre años, en respuesta a las condiciones meteorológicas prevalecientes. De Souza y Formento (2004) y Reis (1989) describieron curvas distintas de progreso de la antesis a nivel de lote en Paraná y Passo Fundo, respondiendo al sistema interactivo variedad-ambiente. De este hecho podrían inferirse imprecisiones en las estimaciones del índice de Fusarium del sistema fundamental-empirico (Moschini *et al.*, 2002), al generalizar un modelo que fue ajustado a la curva de antesis observada sólo en un año (2000) y en un único cultivar (Klein Volcán), en Castelar. En relación al comportamiento genético de los cultivares de trigo a la FET, Goswami and Kistler (2004) señalan que no se disponen de materiales altamente resistentes a la enfermedad. No obstante, los valores del índice de Fusarium predichos por el sistema fundamental-empírico para distintas fechas de espigazón que agrupaban a varios cultivares de trigo, no explicaron el nivel variable de enfermedad observado en la campaña 2002/03, en el sur de Buenos Aires (Carranza *et al.*, 2007) (Tabla I-9).

Ambos sistemas de pronóstico de la FET basados en factores meteorológicos, se desarrollaron bajo el supuesto de inóculo no limitante y ausencia de respuesta a la rotación de cultivos, debido a la marcada ubicuidad de las especies del género *Fusarium*, su amplia gama de hospedantes y la alta diseminación anemófila de las esporas, que pueden ser transportadas desde fuentes distantes (Reis y Carmona, 2002; Saharan *et al.*, 2004). También se asumió que los efectos del comportamiento de los cultivares respecto a la enfermedad y prácticas de cultivo como sistemas de labranza, no aportan significativamente para explicar los variables niveles epidémicos observados (Schaafsma *et al.*, 2001; Lori *et al.*, 2009).

5 CONCLUSIONES

Las predicciones de intensidad de la FET de los sistemas empírico y fundamental-empírico en sitios que no participaron en los desarrollos originales resultaron confiables, haciendo sólo pequeños cambios en los umbrales de la variable térmica y/o en la longitud del período susceptible a la infección.

Ambos sistemas de pronóstico desarrollados y validados precedentemente, pueden estimar retrospectivamente la intensidad anual de la FET en numerosos sitios de la región pampeana, debido a que sólo necesitan para procesar sus variables de elementos meteorológicos simples (temperaturas máxima y mínima, precipitación y humedad relativa) de paso diario, de los cuales se disponen de series históricas (1971-2006 en este estudio) en muchas estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y del INTA. La tenencia de salidas retrospectivas de los modelos (incidencia y severidad de la FET, índice de Fusarium, niveles epidémicos categorizados) en varios sitios de la región pampeana es crucial para abordar los estudios de los capítulos siguientes, que buscarán identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos de creciente escala espacio-temporal, asociados a la FET. Para ello se destacarán en cada caso las modificaciones menores que se implementarán en los sistemas originales, como consecuencia de los trabajos de validación realizados.

CAPÍTULO II

SITUACIONES METEOROLÓGICAS SINÓPTICAS ASOCIADAS A LA OCURRENCIA DE EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET EN TRES SITIOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de pronóstico de enfermedades son un componente de gran utilidad para el manejo de epidemias de cultivos. Un número creciente de sistemas expertos en fitopatología realizan estimaciones de riesgo epidémico basándose en condiciones meteorológicas locales para informar sobre decisiones de manejo. Los sistemas de pronóstico de epidemias alcanzan su máximo potencial en áreas donde las condiciones meteorológicas son esporádicamente favorables para la presencia de la enfermedad, a diferencia de aquellas zonas en las cuales el riesgo epidémico es constante por prevalencia de una situación ambiental altamente conducente (Raposo *et al.*, 1993). En Estados Unidos, para una enfermedad explosiva y dependiente de factores meteorológicos como el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*), se desarrolló el sistema predictivo denominado BLITECAST (Krause *et al.*, 1975) que combina dos viejos pronósticos, el de Hyre (Hyre and Horsfall, 1951) y Wallin (1962). En algunos casos, la determinación de los momentos de aplicación de fungicidas por BLITECAST no ha sido siempre más eficiente que seguir el esquema convencional de control semanal. Este sistema predictivo, como muchos otros, recomienda control químico después que las condiciones meteorológicas han sido favorables para el desarrollo de la enfermedad, cuando los fungicidas preventivos de acción por contacto no son efectivos contra infecciones ya establecidas. Es decir que se analiza la situación ambiental pasada, en lugar de procesar el presente y futuro. Muy escasos son los estudios que han incorporado pronósticos meteorológicos a sistemas predictivos de enfermedades, para realmente predecir la infección u otro evento epidemiológico (Scarpa and Raniere, 1964). Bourke (1970) señaló el valor potencial de analizar la secuencia de factores meteorológicos que favorecen una enfermedad e identificar los tipos de situaciones

meteorológicas recurrentes sobre cartas sinópticas (de superficie y niveles superiores, actuales y pronosticadas), complementando el rol ejercido por modelos simples de predicción. Al quedar establecida la relación entre la enfermedad y determinada situación sinóptica, se reduce la incertidumbre del pronóstico de la ocurrencia de las condiciones meteorológicas conducentes. De esta forma, este autor observó una fuerte asociación entre el ataque de *P. infestans* en papa en la costa NO europea, con la frecuencia y duración de flujos de aire marítimo tropical. En el centro-norte de Estados Unidos, Wallin and Riley (1960) identificaron las condiciones meteorológicas favorables al tizón en papa, analizando mapas sinópticos diarios, de 5 días y 30 días (previamente se volcaron los valores de severidad estimados de la enfermedad). Davis and Snow, (1968), mediante el análisis de cartas sinópticas actuales y pronosticadas, encontraron que la producción de basidiosporas e infección de pino por *Cronartium fusiforme* está ligada a la circulación de aire tropical marítimo, sobre los estados del golfo de México.

Vincelli and Lorbeer (1988) hallaron que la frecuencia y severidad de períodos de infección potencial de *Botrytis squamosa* en cebolla aumentaba con la mayor probabilidad de registrar precipitaciones (pronóstico a 36 hs). Un sistema predictivo fue desarrollado para determinar los momentos de aplicación de fungicidas de contacto contra *B. squamosa*, resultando muy satisfactorio el control cuando las aplicaciones químicas se realizaron con una probabilidad de precipitaciones (derivada del pronóstico meteorológico) mayor o igual a 30% (Vincelli and Lorbeer, 1989). Royer *et al.* (1989) aplicaron pronósticos individuales para pequeñas áreas (1 km^2), derivados de una nueva técnica que combina pronósticos meteorológicos en mesoescala con datos topográficos y elevación, para generar avisos de alarma (se adelantan hasta 2 días) contra *P. infestans* en papa. También para este último patosistema, Raposo *et al*. (1993) estudiaron el efecto potencial de incorporar pronósticos meteorológicos en el sistema predictivo BLITECAST para establecer los momentos de aplicación de fungicidas de contacto. Pronósticos meteorológicos fueron simulados con un modelo de probabilidad que relaciona, distribuciones de observaciones de períodos de humedad relativa alta y sus temperaturas medias, a pronósticos producidos por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos. De esta forma el área bajo la curva de progreso epidémico decreció 5%, aunque se utilizó un mismo número de aplicaciones químicas que con el sistema predictivo convencional. Estos intentos precedentes de usar pronósticos meteorológicos sinópticos en fitopatología tuvieron resultados limitados debido a la pobre calidad de los

datos pronosticados. Desde 2003 nuevos modelos de pronóstico de rango medio extendido (MEX en inglés. USA) mejoraron su utilidad para aplicaciones en fitopatología. Baker and Kirk (2007) compararon la precisión de cuatro tipos de modelos (análisis de determinancia, discriminante, regresión logística y redes neuronales), que incorporan variables (espaciales, temporales y meteorológicas) directas y derivadas de estos pronósticos de rango extendido, para pronosticar a 24, 48, 72, 96 y 120 h el riesgo diario de tizón tardío de la papa (escala Boolean: 0 no riesgo; 1: riesgo), de acuerdo al modelo modificado de Wallin de severidad de la enfermedad. Los modelos de redes neuronales y de regresión logística fueron los más precisos para predecir el riesgo al tizón 5 días antes de su ocurrencia, en comparación con el riesgo estimado con datos climatológicos locales (12 estaciones en Michigan).

Para la región pampeana en Argentina se disponen actualmente de sistemas predictivos validados de la fusariosis de la espiga de trigo (FET), basados en variables meteorológicas (Capítulo I). El potencial de uso de los mismos se considera alto debido a que esta zona, donde se concentra la producción de trigo, esporádicamente presenta condiciones ambientales favorables para generar una epidemia severa. La expresión de esta enfermedad, a diferencia de muchas otras, depende muy fuertemente de la ocurrencia de largos períodos de mojado asociados al registro de precipitaciones (30-72 h) y temperaturas templado-cálidas. Su control con fungicidas puede realizarse con aplicaciones preventivas, independientes de la situación ambiental o siguiendo las recomendaciones de un sistema predictivo. Para un control eficiente, la principal limitante la constituye el escaso tiempo disponible entre la infección y la aplicación del fungicida (1 o 2 días). Algunos de estos elementos potencian la necesidad de incorporar pronósticos meteorológicos en el sistema predictivo. Para ello, primariamente, en la escala sinóptica, se realizarán estudios que caractericen los tipos de circulación asociados a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET. A partir de los trabajos de Alessandro (2003 a, 2003 b, 2008) sobre la influencia de anticiclones de acción bloqueante en el sur sudamericano sobre la temperatura y precipitación en territorio argentino, también se analizará el efecto de este fenómeno sinóptico sobre los niveles epidémicos de la FET. Estos trabajos podrán aportar valiosos elementos para interpretar pronósticos meteorológicos sinópticos (1 a 5 días) disponibles y sobre esta base desarrollar nuevos pronósticos específicos para esta enfermedad.

Para identificar y clasificar tipos de circulación atmosférica se han desarrollado técnicas cada vez más objetivas. Rusticucci y Vargas (1995) estudiaron las olas de calor

y frío sobre Argentina considerando las situaciones sinópticas en superficie, usando el método objetivo de correlación de Lund (1963). A partir de la metodología de Lund, se incorporaron nuevas técnicas de análisis multivariado, como las funciones ortogonales empíricas y análisis de componentes principales (ACP), para asociar la ocurrencia de distintos fenómenos meteorológicos con situaciones sinópticas. Se reconocen dos tipos de ACP para analizar una variable meteorológica en espacio o tiempo: el modo S y el modo T. El primero involucra el análisis de series de tiempo correspondientes a diferentes puntos en el espacio, permitiendo la identificación de regiones homogéneas con respecto a la variabilidad temporal de un parámetro. El modo T analiza campos espaciales en diferentes tiempos (Compagnucci *et al*., 2001). Escobar y Bischoff (1999), utilizando el método de componentes principales (Modo T), pudieron identificar las situaciones sinópticas (se reconocieron dos tipos al relacionar los niveles 1000 hPa y 500 hPa de altura geopotencial) asociadas con decrecimientos térmicos significativos en Buenos Aires. También utilizando técnicas de ACP, Bischoff y Berman (2005) describieron un dipolo (sistema de baja presión en el litoral y de alta presión al sur de Buenos Aires) asociado a las situaciones sinópticas llamadas sudestadas. Otra importante tarea en climatología sinóptica es clasificar secuencias de tipos de circulación o sea obtener tipos dominantes de la evolución de un sistema para estudiar la trayectoria y comportamiento de sistemas sinópticos en un área específica. Este enfoque, desarrollado por Compagnucci *et al.* (2001), fue usado por Escobar *et al*. (2003) para obtener los tipos secuenciales principales (PSP) de altura geopotencial de 1000 hPa asociados a incursiones de aire frío sobre Buenos Aires. Cheng *et al*. (1996) utilizaron ACP, un procedimiento de agrupamiento y análisis de funciones discriminantes, para clasificar los tipos sinópticos más probables asociados a la ocurrencia de lluvias congelantes (cae líquida sobre una superficie de temperatura menor a 0°C). La regresión logística stepwise fue utilizada para identificar, sobre todos los días dentro de los tipos sinóptico relacionados a lluvia congelante, las óptimas variables meteorológicas predictoras de la probabilidad de ocurrencia de tal evento.

El objetivo de este capítulo fue identificar situaciones meteorológicas sinópticas asociadas a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET (estimados por sistema de pronóstico fundamental-empírico), en varios sitios de la región pampeana.

2-1 CARACTERIZACIÓN DE TIPOS SINÓPTICOS ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET

2-1-1 MATERIALES Y MÉTODOS

Identificación temporal de eventos infectivos de la FET y su categorización por magnitud de la severidad predicha

En este trabajo se utilizaron registros diarios de temperatura máxima y mínima, precipitación y humedad relativa (promedio de las observaciones de las 9, 15 y 21 h) provenientes de las estaciones meteorológicas convencionales de las EEA INTA Paraná, Concepción del Uruguay, Oliveros, Pergamino y Balcarce (serie 1971-2006). A partir de esta información se identificaron los eventos infectivos ocurridos en lapsos de 45 días, en los cuales pueden presentarse espigas con anteras expuestas. Para ello se utilizó el sistema de pronóstico fundamental empírico desarrollado por Moschini *et al.* (2002), el cual identifica los eventos infectivos en correspondencia a períodos de mojado (24 a 72 h) estimados por la ocurrencia simultánea de precipitación y valores de humedad relativa del aire superior a determinados umbrales (relaciones de equivalencia). Luego se estableció el día de inicio de cada evento de infección de la FET. Seguidamente se estimó la severidad (S %) de cada evento infectivo identificado (Ecuación I-4, sistema fundamental-empírico), en los sitios de la región pampeana especificados. Se fijaron límites (percentiles) de la distribución empírica de frecuencia de la severidad de la FET de los 731 eventos infectivos reconocidos en los cinco sitios, con el fin de categorizar los valores de intensidad de enfermedad. Las severidades de la FET se categorizaron en los siguientes niveles: severo (S >3,7 %), moderada (S<=3,7% y >1%), ligera (S<=1%). Cada evento infectivo predicho tuvo una duración mínima de 24 h y una máxima de 72 h, en función de la duración de mojado estimado por el sistema de pronóstico. Se identificarán los días de inicio de dichos eventos infectivos.

El estudio se continuó para tres sitios: Paraná, Pergamino y Balcarce, con el objetivo de establecer y describir el tipo sinóptico más frecuente, representado en mapas secuenciales de tres días (días inicial de cada evento infectivo y los dos previos) de altura geopotencial en 1000 hPa, asociado a eventos infectivos de la FET severos y ligeros. En primer lugar, por sitio, se calculó el porcentaje de eventos severos (S>3,7%) y ligeros (S<=1%) que registraron largas duraciones de mojado (>=30 h).

Matrices de secuencias de 3 días de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa (análisis por sitio)

A partir de los reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), disponibles en la página Web de la NOAA, se obtuvieron las matrices de altura geopotencial diaria para 1000 hPa (resolución 2,5° x 2,5°), a escala planetaria. Cada matriz correspondiente al día inicial de cada evento infectivo y de los 2 días previos se importaron a Excel, eliminando el encabezado (11 filas) y se volvieron a guardar como texto sin tabulaciones. Paso seguido, con el lenguaje del paquete estadístico SAS, se elaboró un programa para extraer de cada matriz planetaria el sector del hemisferio sur a analizar (130° a 40° W; 20° a 60° S).

Definición de tipos sinópticos ligados a eventos infectivos de la FET (severos y ligeros, para cada sitio)

Usando la técnica desarrollada por Lund (1963), cada matriz secuencial del nivel de 1000 hPa (hg) fue correlacionada (r: coeficiente de correlación de Pearson) con todas las otras matrices secuenciales analizadas. Cada matriz secuencial representó un proceso independiente. La secuencia de 3-días con el mayor número de correlaciones (r) >=0.70 se designó como tipo sinóptico A (solo se trabajó con el tipo sinóptico más frecuente). Todas las matrices secuenciales de 3 días incluidas en el tipo sinóptico para eventos infectivos severos (A-sev) y ligeros (A-lig), fueron promediadas por separado (punto por punto de la grilla para el nivel de 1000 hPa). Con cada matriz de valores medios se confeccionaron mapas (paquete Surfer) para reconocer el campo medio de circulación de cada modelo o tipo sinóptico, asociado a la ocurrencia de eventos infectivos contrastantes de la FET (severos y ligeros), en Paraná, Pergamino y Balcarce. También se elaboraron mapas de las matrices secuenciales de 3 días de altura geopotencial para 1000 hPa correspondientes a los días que logran el mayor número de correlaciones. Para dichos día iniciales del evento infectivo y los 2 posteriores, también se elaboraron mapas de anomalías a 1000 hPa (en total: 6 mapas de anomalías: dos por cada sitio para epidemias severas y ligeras). Estos mapas de anomalías buscaron explicar la posible persistencia de condiciones ciclónicas en los días posteriores al inicio de cada evento infectivo severo o de rápido cambio de esas condiciones en eventos ligeros, bajo el supuesto de mayor ocurrencia de mojados de larga duración (>=30 h) o de corta duración (24 y 27 h) acompañando a las infecciones severas y ligeras respectivamente (se verificará).

2-1-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2-1-2-1 Sitio: Paraná

En Paraná se identificaron 51 y 27 eventos infectivos de la FET severos y ligeros respectivamente. El 78,4 % (40) de los eventos severos (severidad de la FET >3,7 %) registraron valores estimados de duración de mojado iguales o mayores a 30 h. Del total de 27 eventos ligeros (severidad de la FET <= 1 %), 20 eventos (74,1 %) estuvieron acompañados de lapsos de mojado de corta duración (24 y 27 h).

Eventos severos de la FET.

Una secuencia de mapas comprendiendo el día inicial del evento infectivo: 12/10/1993 y los 2 días previos, logró el mayor número de correlaciones (r) >=0.70 con el resto de las secuencias (se correlacionó con r>=0,7 con 32 secuencias de 3 días de las 51 analizadas). Esta configuración de la secuencia recurrente de mapas de 3 días para los eventos infectivos severos se designó tipo sinóptico A-sev (Figura II-1). El tipo sinóptico A-sev Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla de hgp a 1000 hPa) las 33 secuencias de mapas de 3 días (Figura II-2). En la figura II-3 se presenta el mapa de anomalía a 1000 hPa para el día inicial 12/10/1993 que definió el tipo sinóptico A-sev y los 2 días posteriores.

Eventos ligeros de la FET.

En estos casos una secuencia de mapas que incluye el día inicial del evento infectivo: 16/9/1982 y los 2 días previos, agrupó con r>=0,7 el mayor número de secuencias Estas configuración de la secuencia de mapas de 3 días que agrupó a 14 eventos infectivos ligeros de la FET de un total de 27, se denominó tipo sinóptico A-lig (Figura II-4). El tipo sinóptico A-lig Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla de hgp a 1000 hPa) las 14 secuencias de 3 días correlacionadas con r>=0,7 (Figura II-5). En la figura II-6 se presenta el mapa de anomalía a 1000 hPa para el día inicial 16/09/1982 que definió el tipo sinóptico A-lig y los 2 días posteriores.

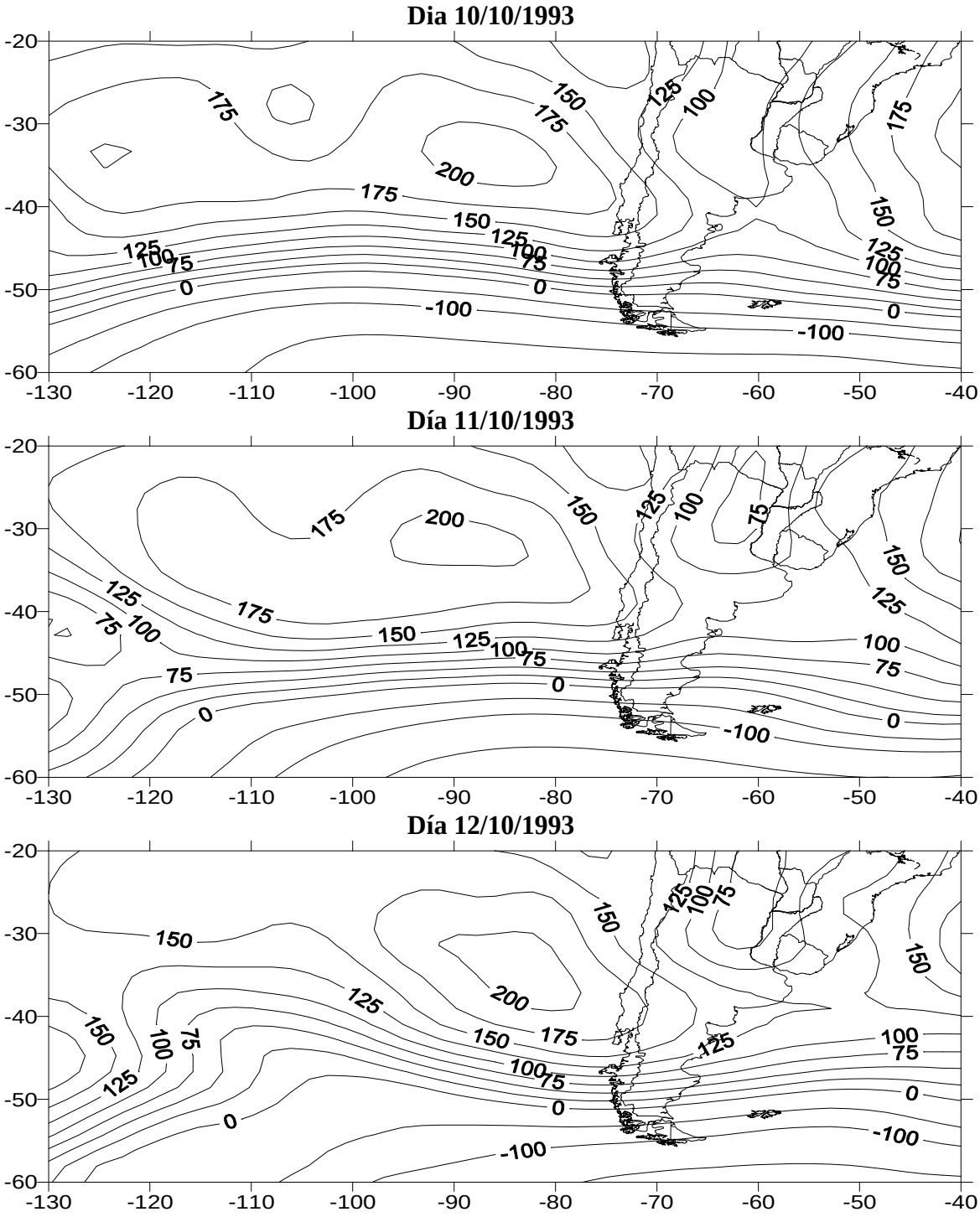

Figura II-1. **Tipo sinóptico A-sev** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para 1000 hPa del día 12/10/1993 (día inicial de evento infectivo severo de la FET) y de los dos previos. Sitio: Paraná

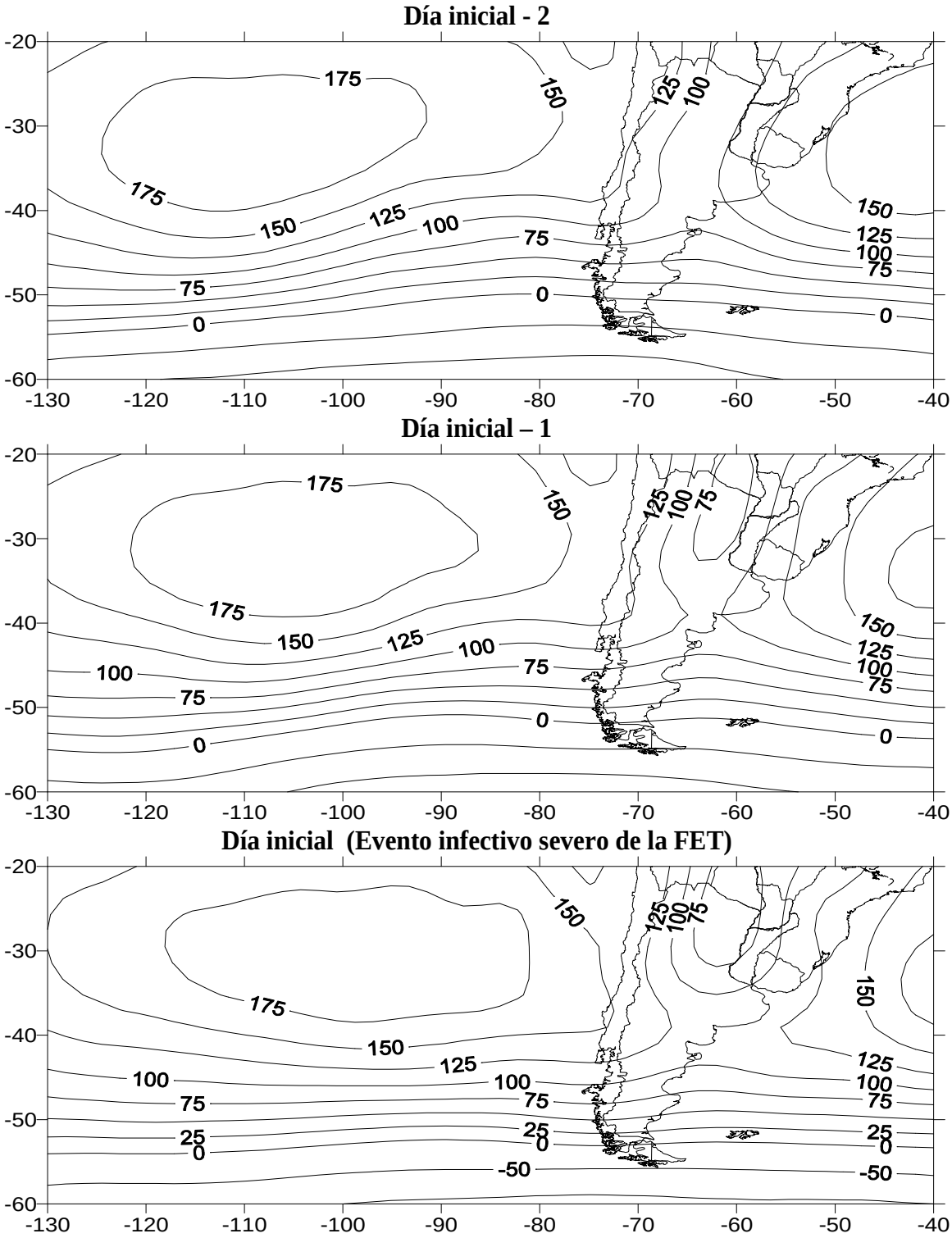

Figura II-2. **Tipo sinóptico A-sev Medio** resultante de promediar las 33 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de evento infectivo severo de la FET y de los dos previos. Sitio: Paraná

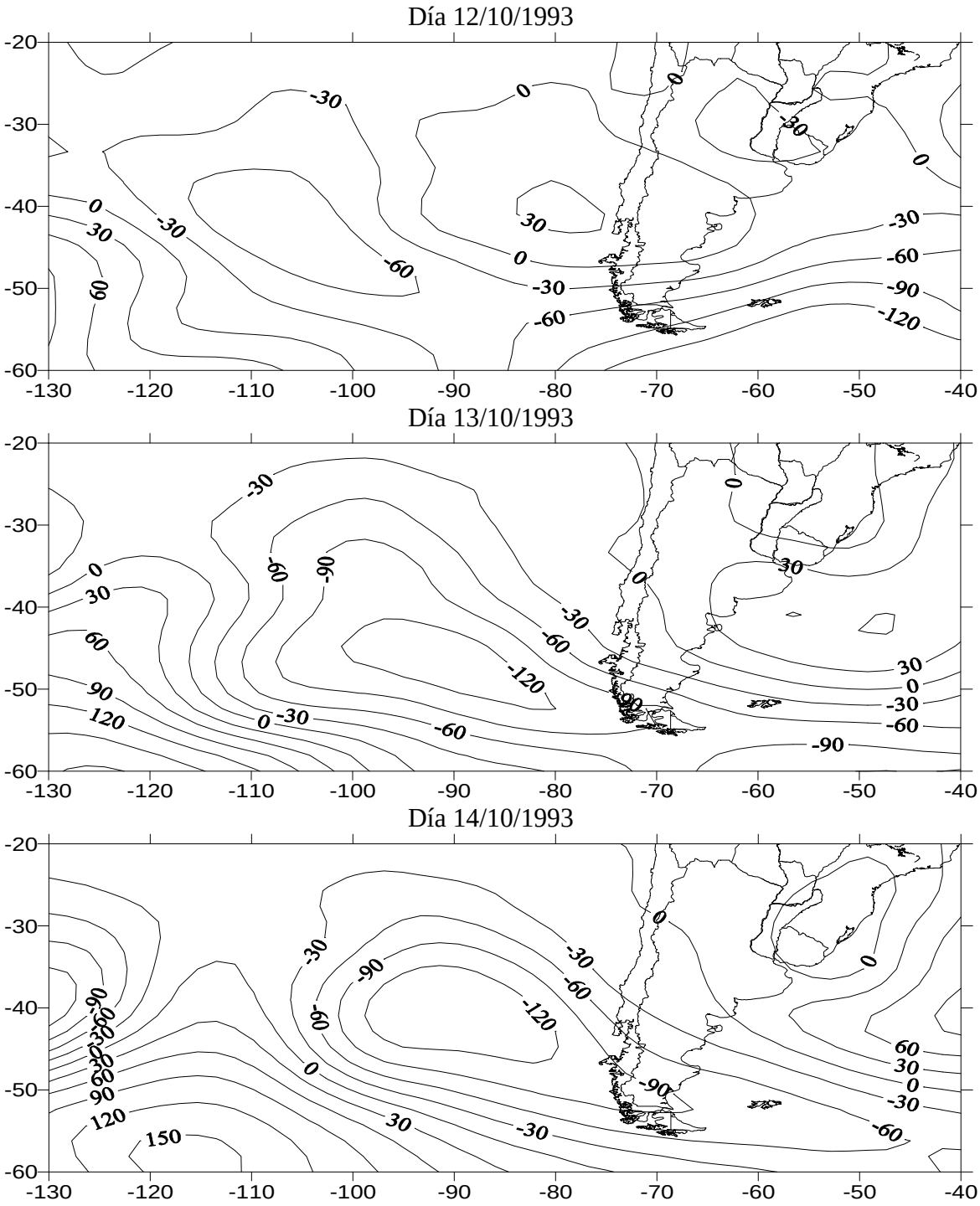

Figura II-3. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial (12/10/1993) de evento infectivo severo de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Paraná

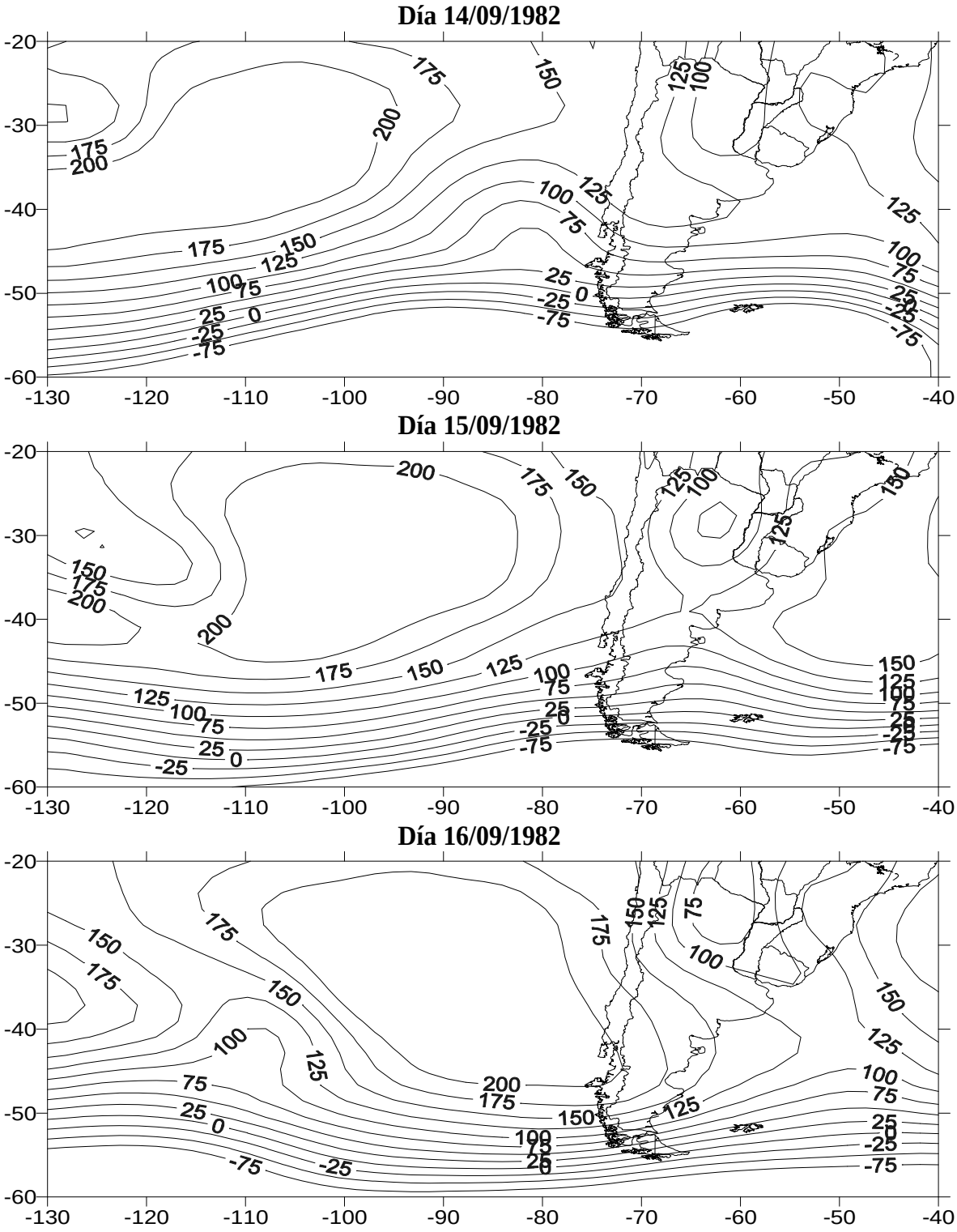

Figura II-4. **Tipo sinóptico A-lig** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para 1000 hPa del día 16/09/1982 (día inicial de evento infectivo ligero de la FET) y de los dos previos. Sitio: Paraná

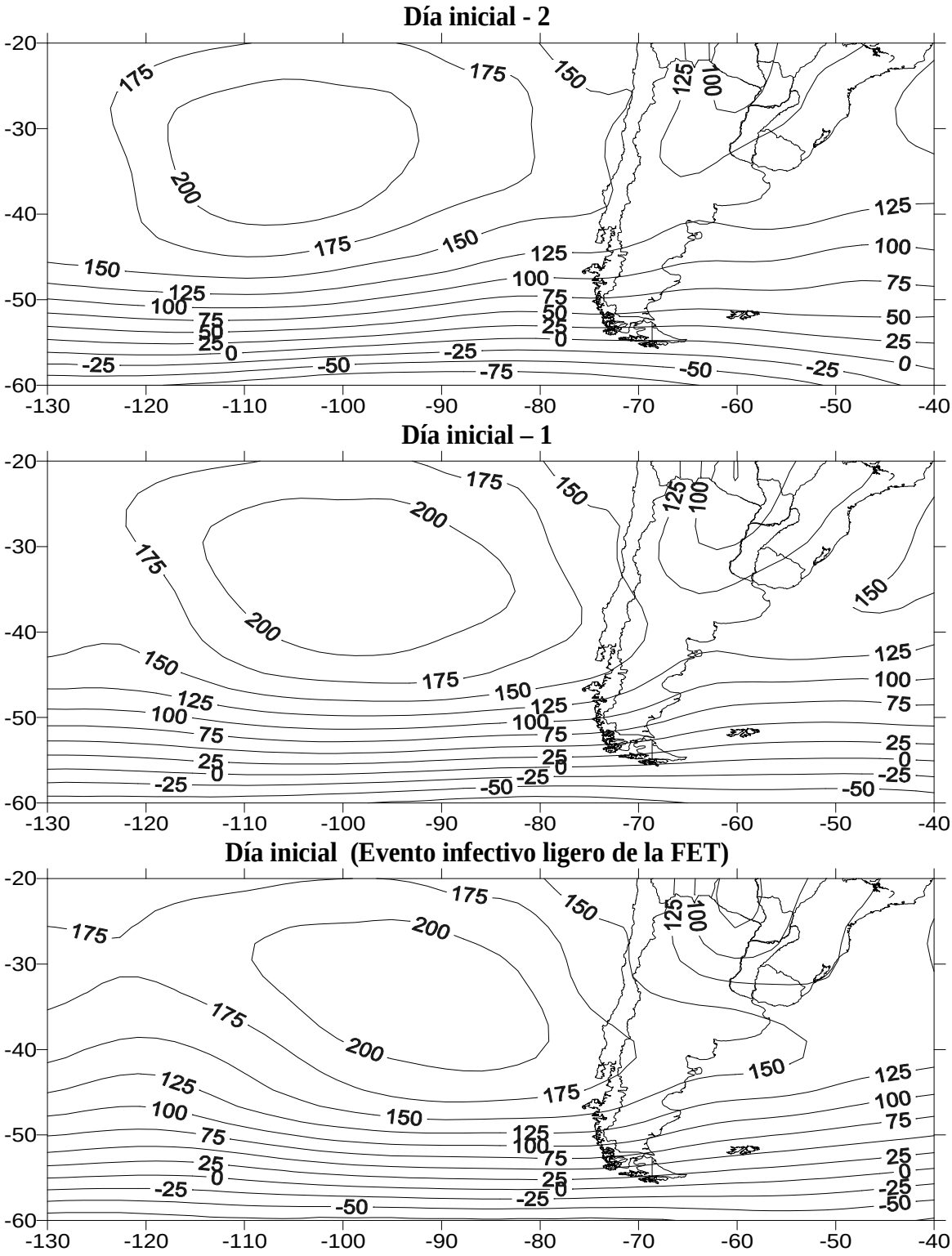

Figura II-5. **Tipo sinóptico A-lig Medio** resultante de promediar las 14 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de evento infectivo ligero de la FET y de los dos previos. Sitio: Paraná

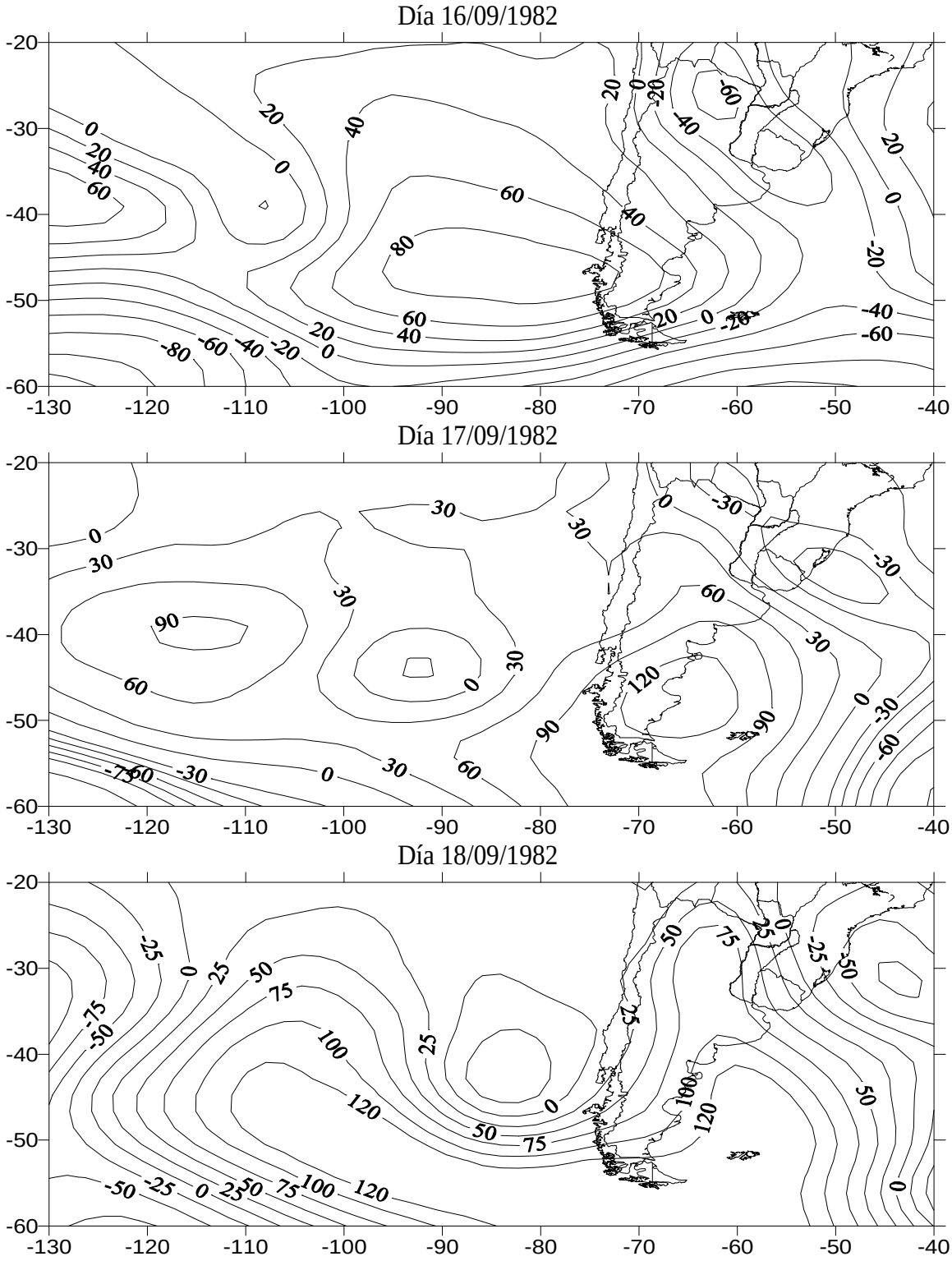

Figura II-6. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial (16/09/1982) de evento infectivo ligero de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Paraná

El modelo sinóptico Tipo A relacionado a eventos severos (Figuras II-1 y II-2) presenta la formación, hacia el centro-norte de Argentina, de un centro de baja presión, que involucra movimientos verticales ascendentes de aire que promueven la ocurrencia de precipitaciones (fuente primaria de períodos de mojado requerido para infecciones de la FET). La figura II-3 confirma la presencia de una fuerte anomalía (-30 hPa) en el centro norte argentino. También es característica la presencia de dos fuertes anticiclones operando en el Pacífico y Atlántico. La fuerte actividad del centro de alta presión Atlántico produce advección de aire cálido y húmedo durante los dos días previos al inicio de un evento infectivo de la FET severo. La ocurrencia de largos períodos de mojado (40 de 51 eventos infectivos severos de la FET con mojados >= a 30 h) asociados a precipitación podría explicarse por la persistencia de condiciones ciclónicas desde Paraná hacia el norte, en los dos días posteriores al 12/10/93 (día inicial del evento infectivo que lidera el tipo sinóptico A-sev).

La estructura del modelo sinóptico Tipo A relacionado a eventos infectivos ligeros de la FET (Figuras II-4 y II-5) se caracterizó por la presencia de una fuerte área de baja presión sobre el centro-norte argentino (fuerte anomalía negativa en el día inicial del evento infectivo: figura II-6). El centro de alta presión Atlántico está muy debilitado, siendo limitado el ingreso de aire húmedo de origen oceánico por el norte. La muy fuerte circulación del anticiclón del Pacífico empuja rápidamente el ciclón continental hacia el norte de Argentina. Esta aseveración se afirma observando el posicionamiento de una anomalía positiva en centro norte argentino en los dos días posteriores al 16/09/82 (Figura II-6). Este proceso podría explicar la ocurrencia dominante de períodos de mojado de menos de 30 h (74,1 % del total de eventos ligeros de la FET), originados por precipitación.

2-1-2-2 Sitio: Pergamino

En este sitio se identificaron 32 y 45 eventos infectivos de la FET severos y ligeros respectivamente, incluyendo sus días de inicio. El 87,5% de los eventos severos (28) registraron valores estimados de duración de mojado iguales o mayores a 30 h. Del total de 45 eventos ligeros (severidad de la FET <= 1%), 30 eventos (66,7%) estuvieron acompañados de lapsos de mojado de corta duración (24 y 27 h).

Eventos severos de la FET.

Una secuencia de mapas comprendiendo el día inicial del evento infectivo: 28/10/1990 y los 2 días previos, logró el mayor número de correlaciones (r) >=0.70 con el resto de las secuencias (se correlacionó con r>=0,7 con 30 secuencias de 3 días de las 32 analizadas). Esta configuración de la secuencia recurrente de mapas de 3 días para los eventos infectivos severos se designó tipo sinóptico A-sev (Figura II-7). El tipo sinóptico A-sev Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla para el nivel de 1000 hPa) las 31 secuencias de mapas de 3 días (Figura II-8). En la figura II-9 se presenta el mapa de anomalía para 1000 hPa para el día inicial 28/10/1990 que definió el tipo sinóptico A-sev y los 2 días posteriores.

Eventos ligeros de la FET.

En estos casos una secuencia de mapas que incluye el día inicial del evento infectivo: 19/10/1974 y los 2 días previos, agrupó con r>=0,7 el mayor número de secuencias Esta configuración de la secuencia de mapas de 3 días que agrupó a 31 eventos infectivos ligeros de la FET de un total de 45, se denominó tipo sinóptico A-lig (Figura II-10). El tipo sinóptico A-lig Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla para el nivel de 1000 hPa) las 32 secuencias de 3 días correlacionadas con r>=0,7 (Figura II-11). En la figura II-12 se presenta el mapa de anomalía para 1000 hPa para el día inicial 19/10/1974 que definió el tipo sinóptico A-lig y los 2 días posteriores.

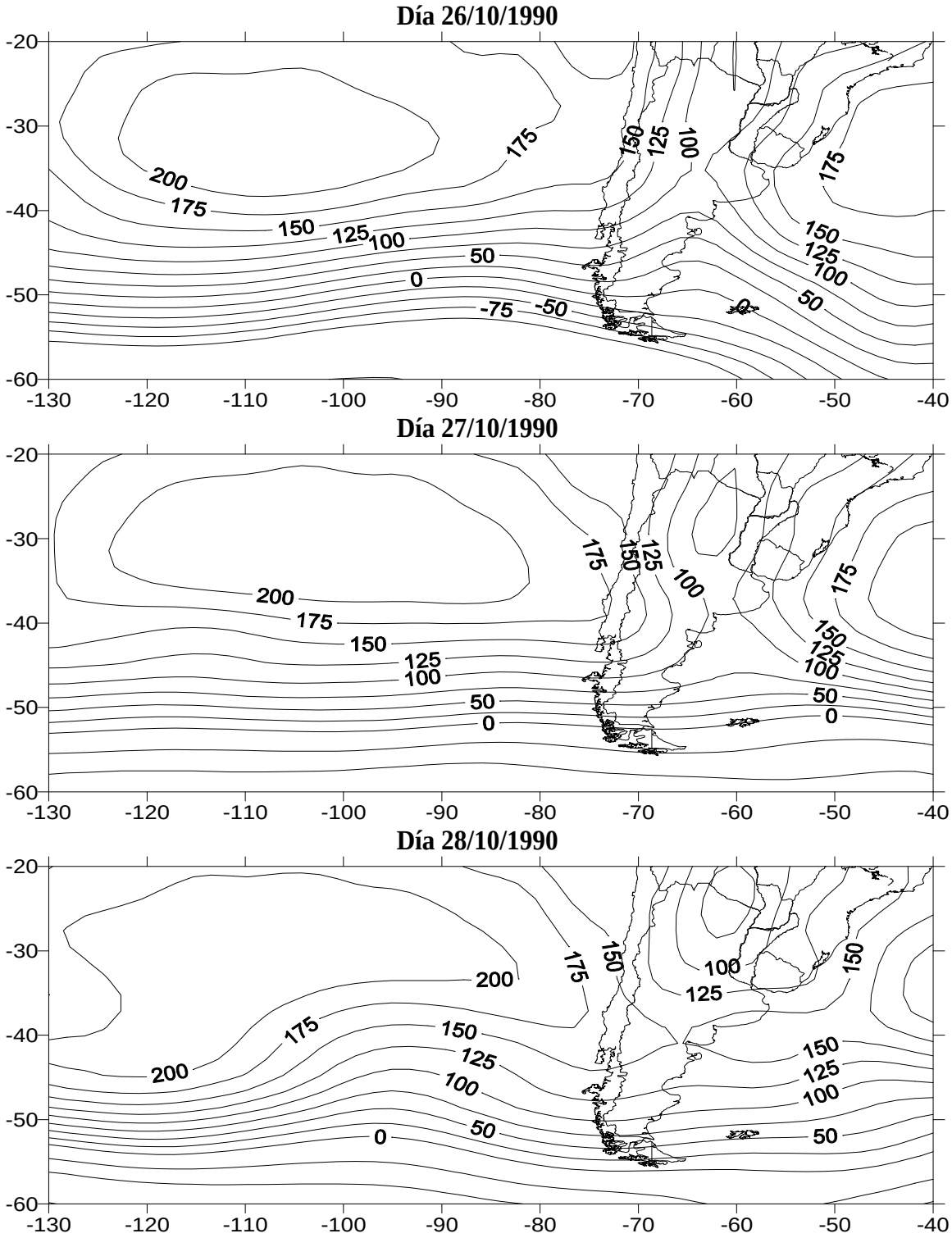

Figura II-7. **Tipo sinóptico A-sev** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día 28/10/1990 (día inicial de evento infectivo severo de la FET) y de los dos previos. Sitio: Pergamino

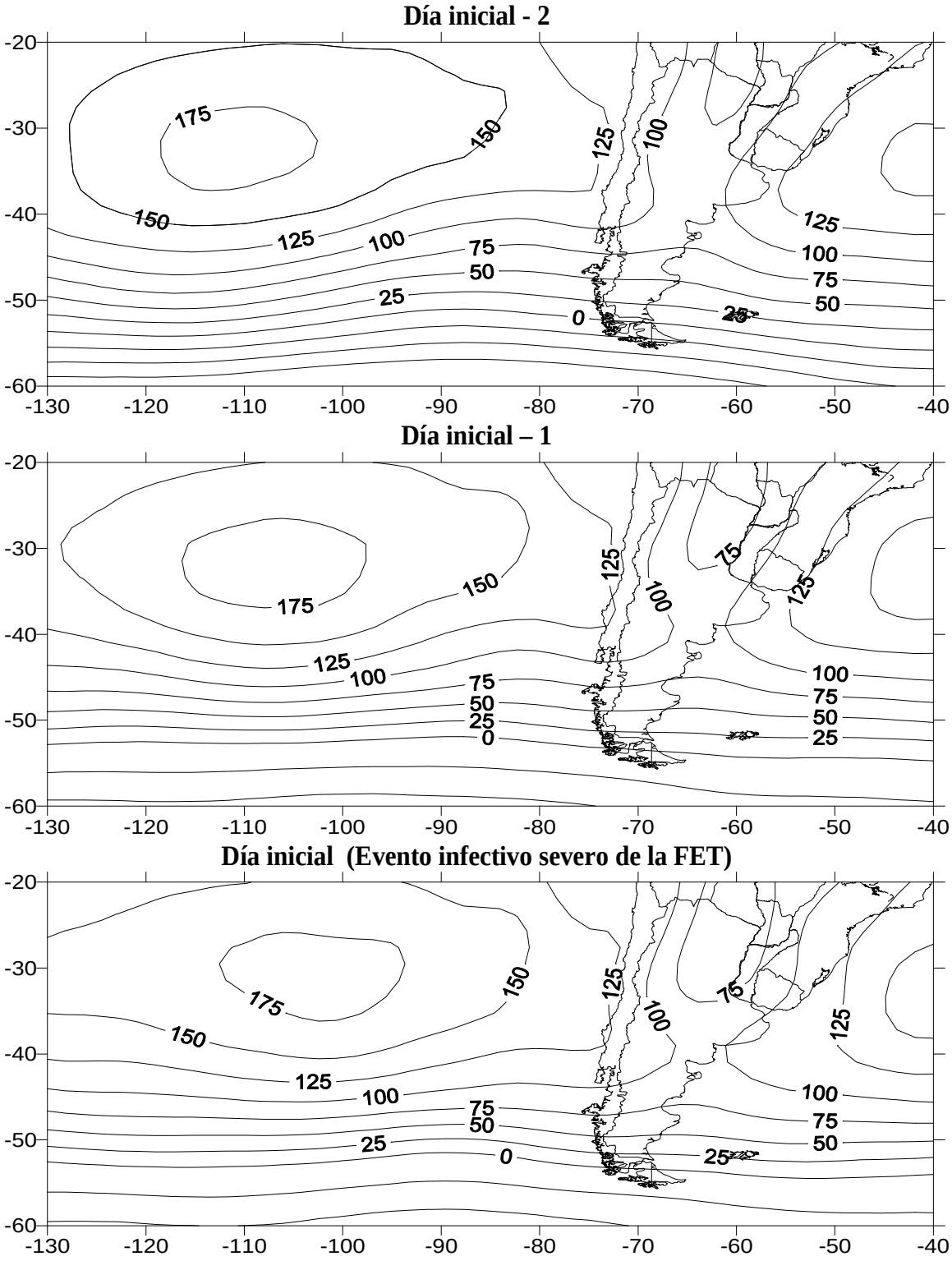

Figura II-8. **Tipo sinóptico A-sev Medio** resultante de promediar las 31 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de evento infectivo severo de la FET y de los dos previos. Sitio: Pergamino

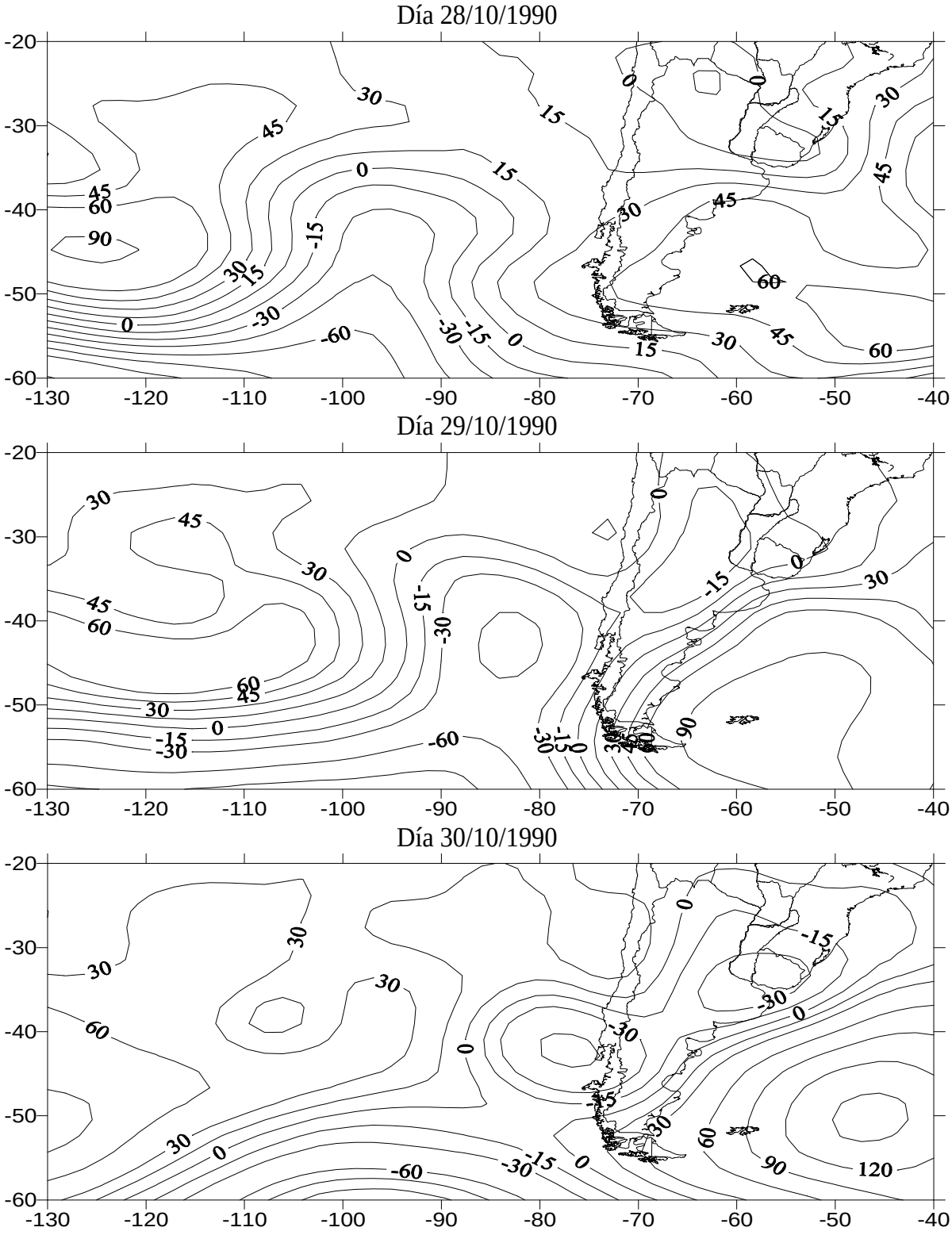

Figura II-9. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día inicial (28/10/1990) de evento infectivo **severo** de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Pergamino

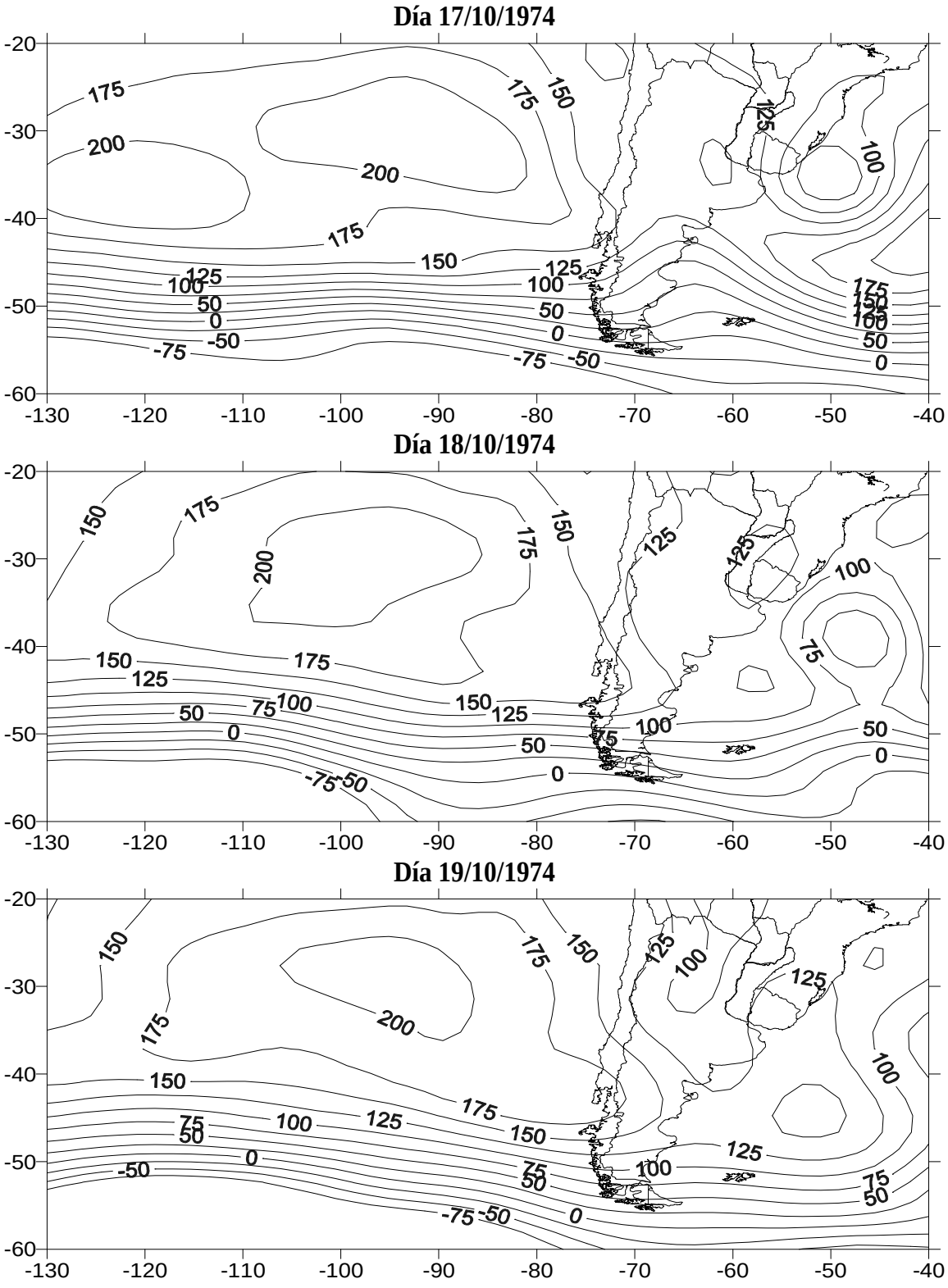

Figura II-10. **Tipo sinóptico A-lig** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día 19/10/1974 (día inicial de evento infectivo ligero de la FET) y de los dos previos. Sitio: Pergamino

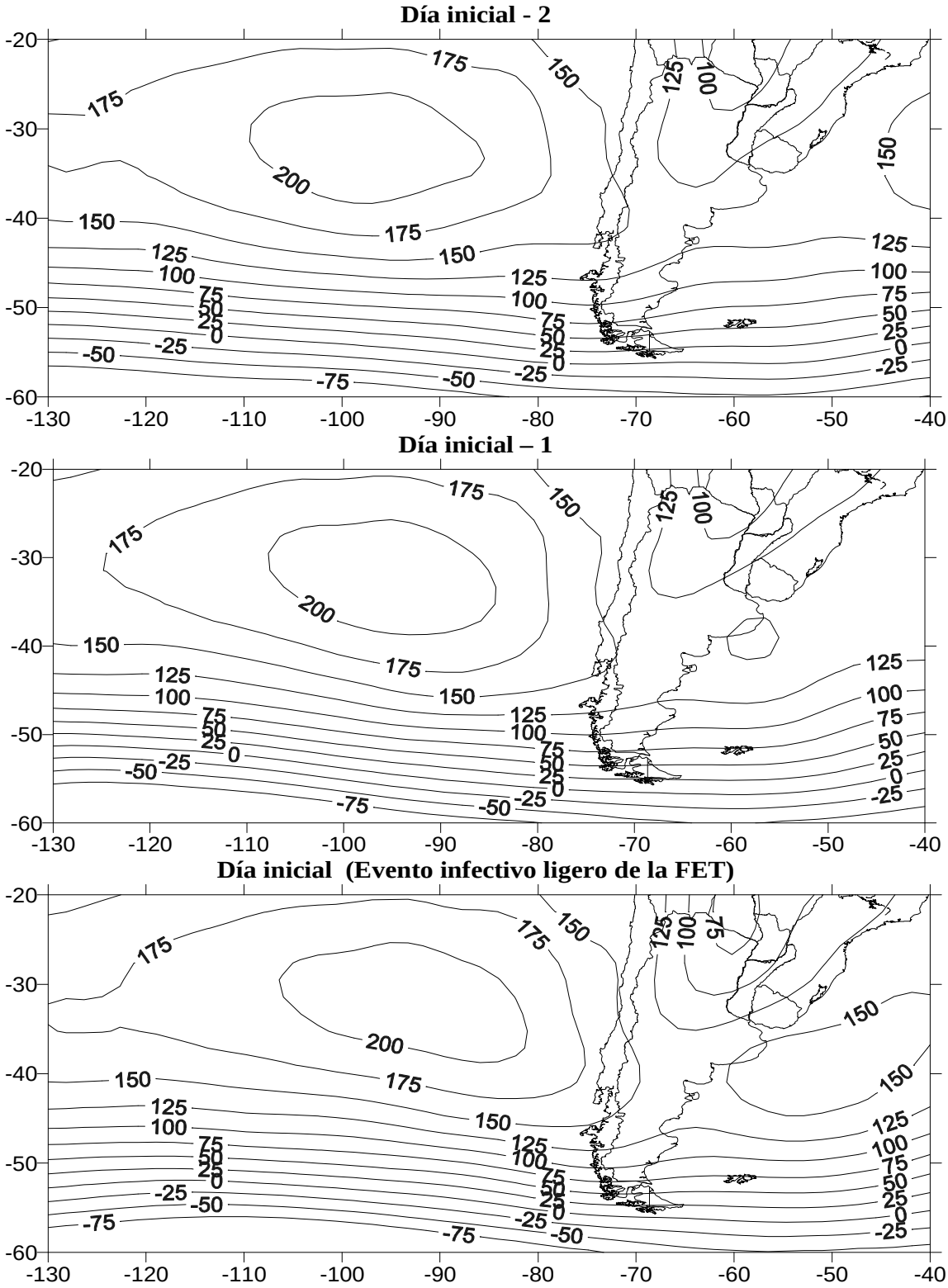

Figura II-11. **Tipo sinóptico A-lig Medio** resultante de promediar las 32 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de evento infectivo ligero de la FET y de los dos previos. Sitio: Pergamino

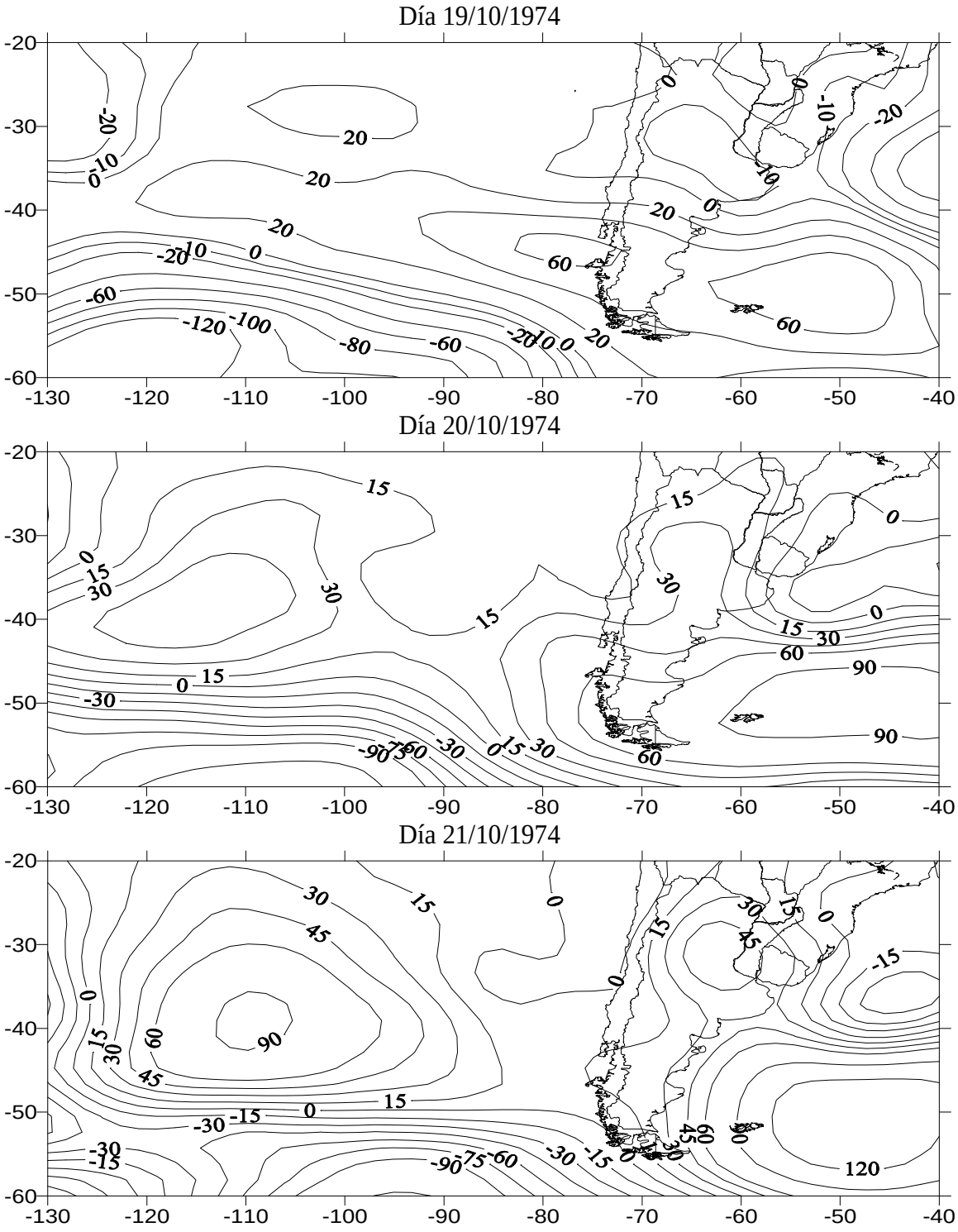

Figura II-12. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día inicial (19/10/1974) de evento infectivo ligero de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Pergamino

El tipo sinóptico A-sev relacionado a eventos severos de la FET registrados en Pergamino (Figuras II-7 y II-8) es muy similar al descripto para Paraná. En el centro-norte de Argentina se va posicionando un centro de baja presión (75 hPa de altura geopotencial en el día inicial del evento infectivo), conducente a la ocurrencia de precipitaciones (fuente primaria de períodos de mojado requerido para infecciones de la FET). La figura II-9 señala la presencia de una fuerte anomalía negativa en los dos días posteriores al inicio del evento infectivo (día 28/10/90), justificando la ocurrencia de largos períodos de mojado (28 de 32 eventos severos tuvieron duraciones de mojado >= 30 h originados por precipitación) asociados a infecciones severas de la FET. Como en Paraná, es característica la presencia de dos fuertes anticiclones operando en el Pacífico y Atlántico. La fuerte actividad del centro de alta presión Atlántico produce advección de aire cálido y húmedo durante los dos días previos al inicio de un evento infectivo de la FET severo. La actividad ciclónica desde Pergamino hacia el norte no es desactivada a partir del día inicial del evento infectivo, prevaleciendo altas presiones en el sector sur de la región pampeana.

Una débil actividad ciclónica domina el centro norte de Argentina de acuerdo al tipo sinóptico del día 19/10/74 y el que describe el campo medio, para eventos infectivos ligeros de la FET (Figuras II-10 y II-11). El centro de alta presión Atlántico está muy debilitado, observándose una anomalía negativa en 35 °S y una positiva en 40-45° S (Figura II-12), las cuales producen vientos de dirección sur sobre Pergamino en los días posteriores al 19/10/74. Es fuerte la circulación del anticiclón del Pacífico que rápidamente instala condiciones de alta presión en superficie en el centro-norte argentino (Figura II-12). Este proceso podría explicar la dominante ocurrencia de cortos períodos de mojado (66,7 % del total de eventos ligeros con duraciones < a 30 h).

2-1-2-3 Sitio: Balcarce

En Balcarce se identificaron 24 y 94 eventos infectivos de la FET severos y ligeros respectivamente, incluyendo sus días de inicio. El 91,7 % de los eventos severos registraron valores estimados de duración de mojado iguales o mayores a 30 h. Del total de 94 eventos ligeros (severidad de la FET <= 1 %), 63 eventos (67 %) estuvieron acompañados de lapsos de mojado de corta duración (24 y 27 h).

Eventos severos de la FET.

Una secuencia de mapas comprendiendo el día inicial del evento infectivo: 20/11/1990 y los 2 días previos, logró el mayor número de correlaciones (r) >=0.70 con el resto de las secuencias (se correlacionó con r>=0,7 con 18 secuencias de 3 días de las 24 analizadas). Esta configuración de la secuencia recurrente de mapas de 3 días para los eventos infectivos severos se designó tipo sinóptico A-sev (Figura II-13). El tipo sinóptico A-sev Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla de hgp a 1000 hPa) las 19 secuencias de mapas de 3 días (Figura II-14). En la figura II-15 se presenta el mapa de anomalía a 1000 hPa para el día inicial 20/11/1990 que definió el tipo sinóptico A-sev y los 2 días posteriores.

Eventos ligeros de la FET.

En estos casos una secuencia de mapas que incluye el día inicial del evento infectivo: 29/10/1990 y los 2 días previos, agrupó con r>=0,7 el mayor número de secuencias. Estas configuración de la secuencia de mapas de 3 días que agrupó a 68 eventos infectivos ligeros de la FET de un total de 94, se denominó tipo sinóptico A-lig (Figura II-16). El tipo sinóptico A-lig Medio resultó de promediar (punto por punto de la grilla de hgp a 1000 hPa) las 69 secuencias de 3 días correlacionadas con r>=0,7 (Figura II-17). En la figura II-18 se presenta el mapa de anomalía a 1000 hPa para el día inicial 29/10/1990 que definió el tipo sinóptico A-lig y los 2 días posteriores.

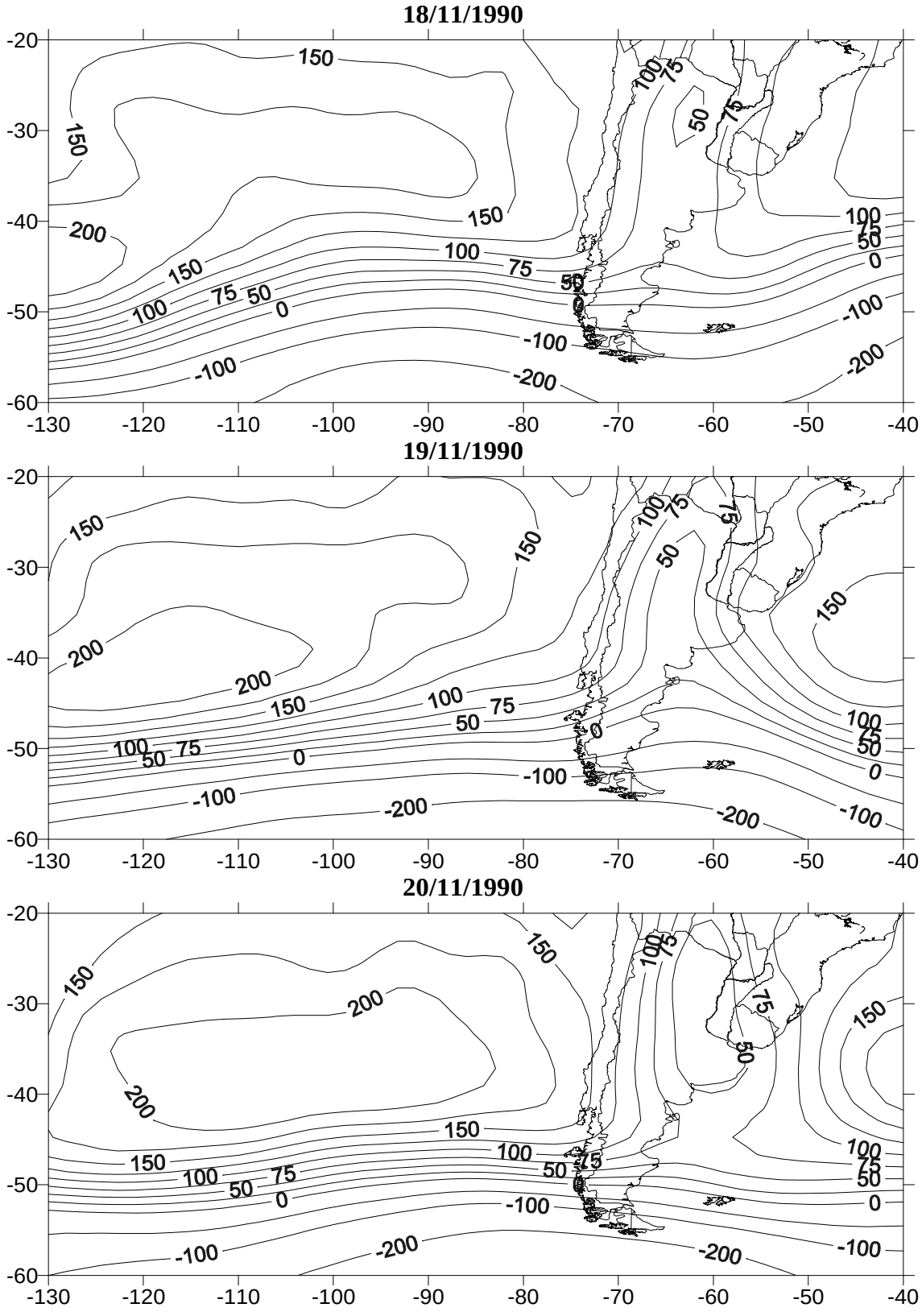

Figura II-13. **Tipo sinóptico A-sev** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día 20/11/1990 (día inicial de evento infectivo ligero de la FET) y de los dos previos. Sitio: Balcarce

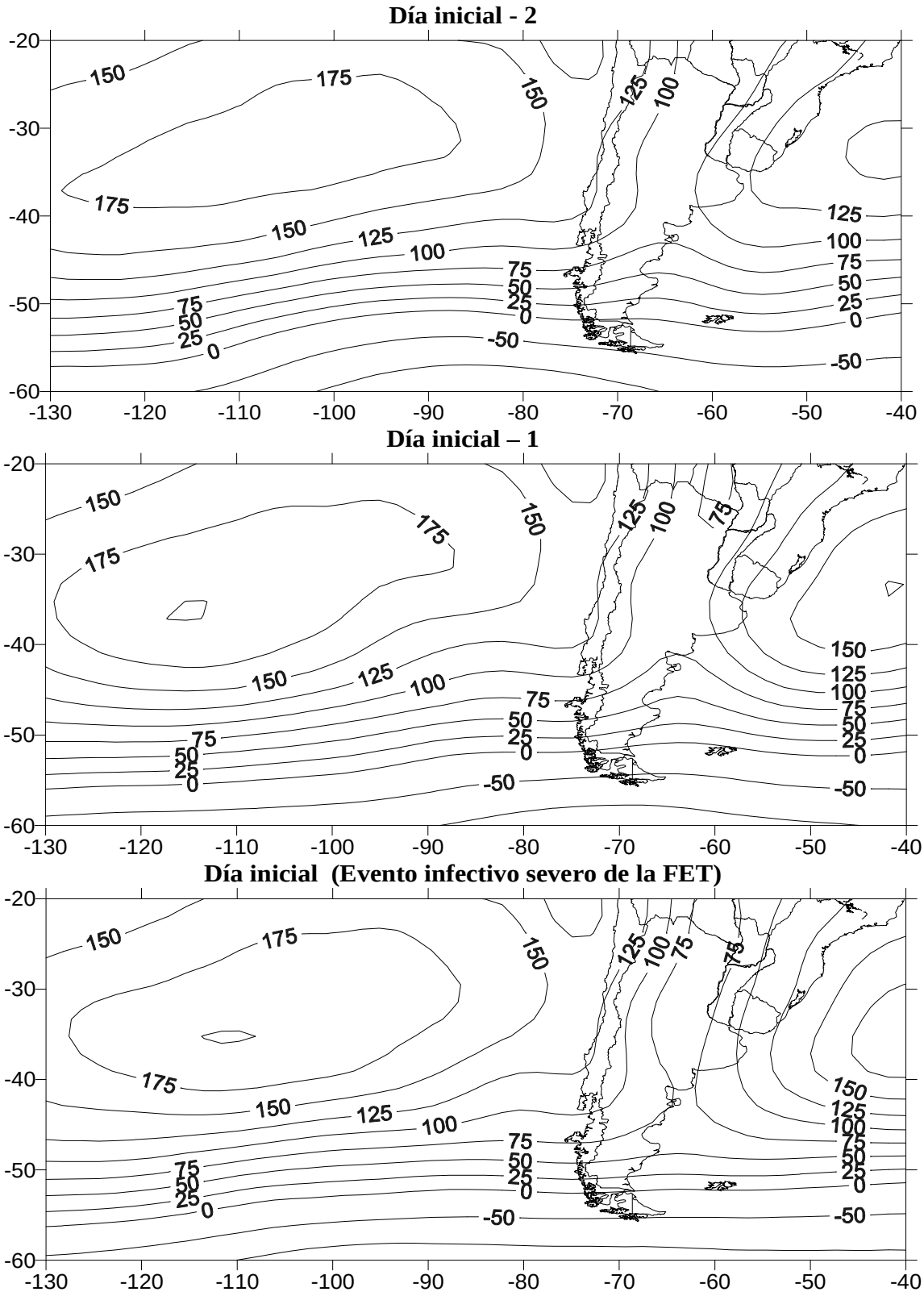

Figura II-14. **Tipo sinóptico A-sev Medio** resultante de promediar las 19 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día inicial de evento infectivo severo de la FET y de los dos previos. Sitio: Balcarce

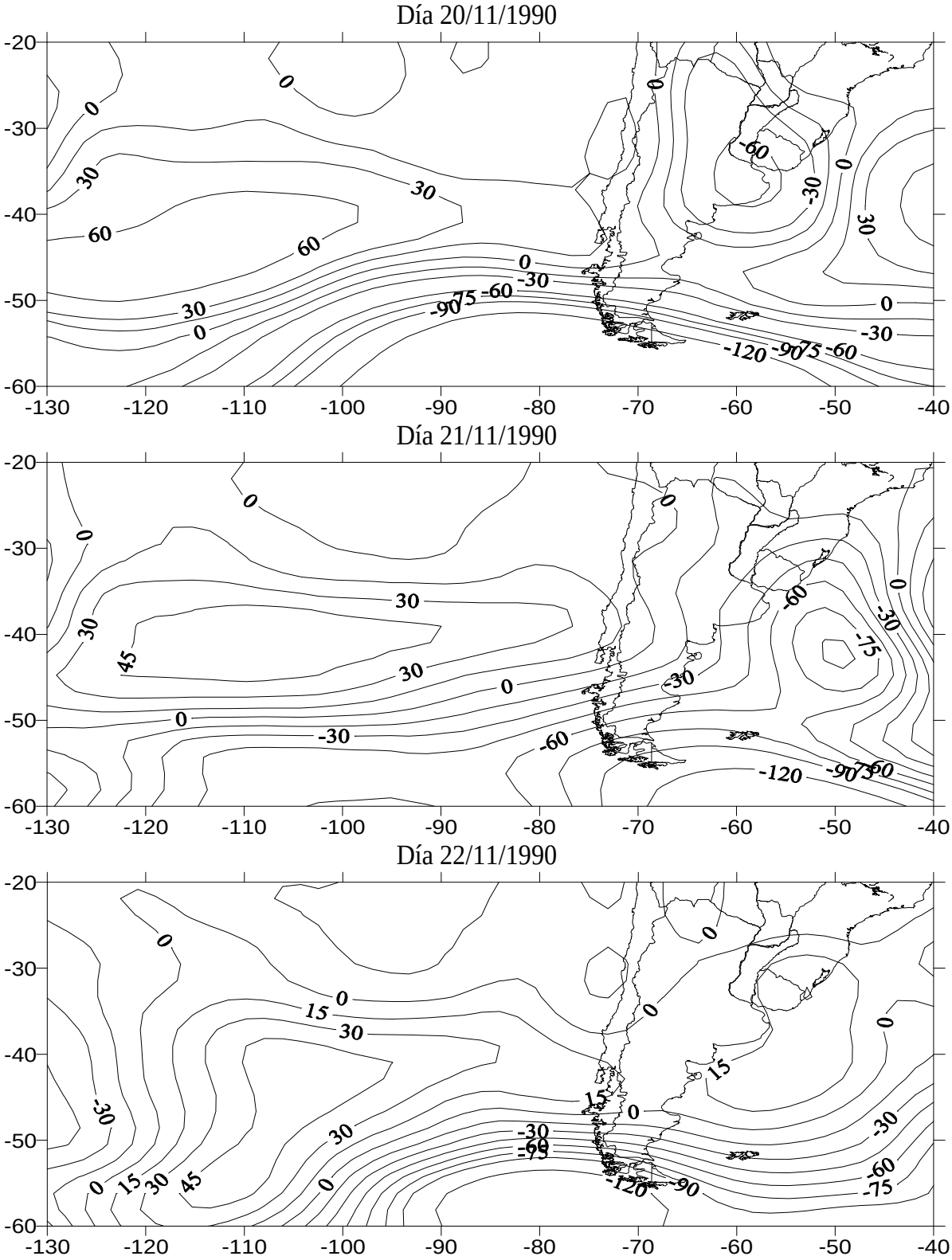

Figura II-15. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial (20/11/1990) de evento infectivo severo de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Balcarce

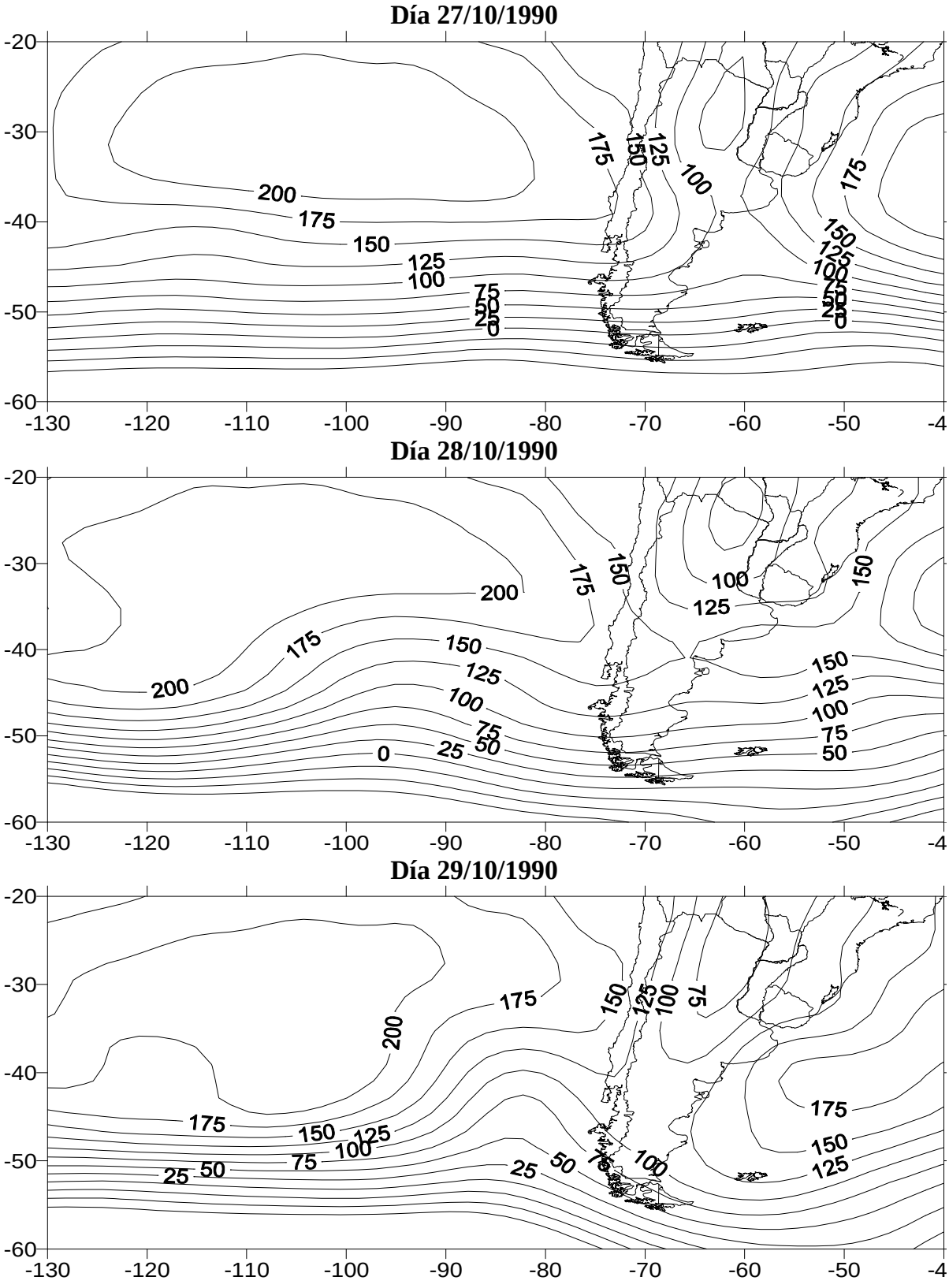

Figura II-16. **Tipo sinóptico A-lig** correspondiente a la secuencia de mapas de 3 días de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día 29/10/1990 (día inicial de evento infectivo ligero de la FET) y de los dos previos. Sitio: Balcarce

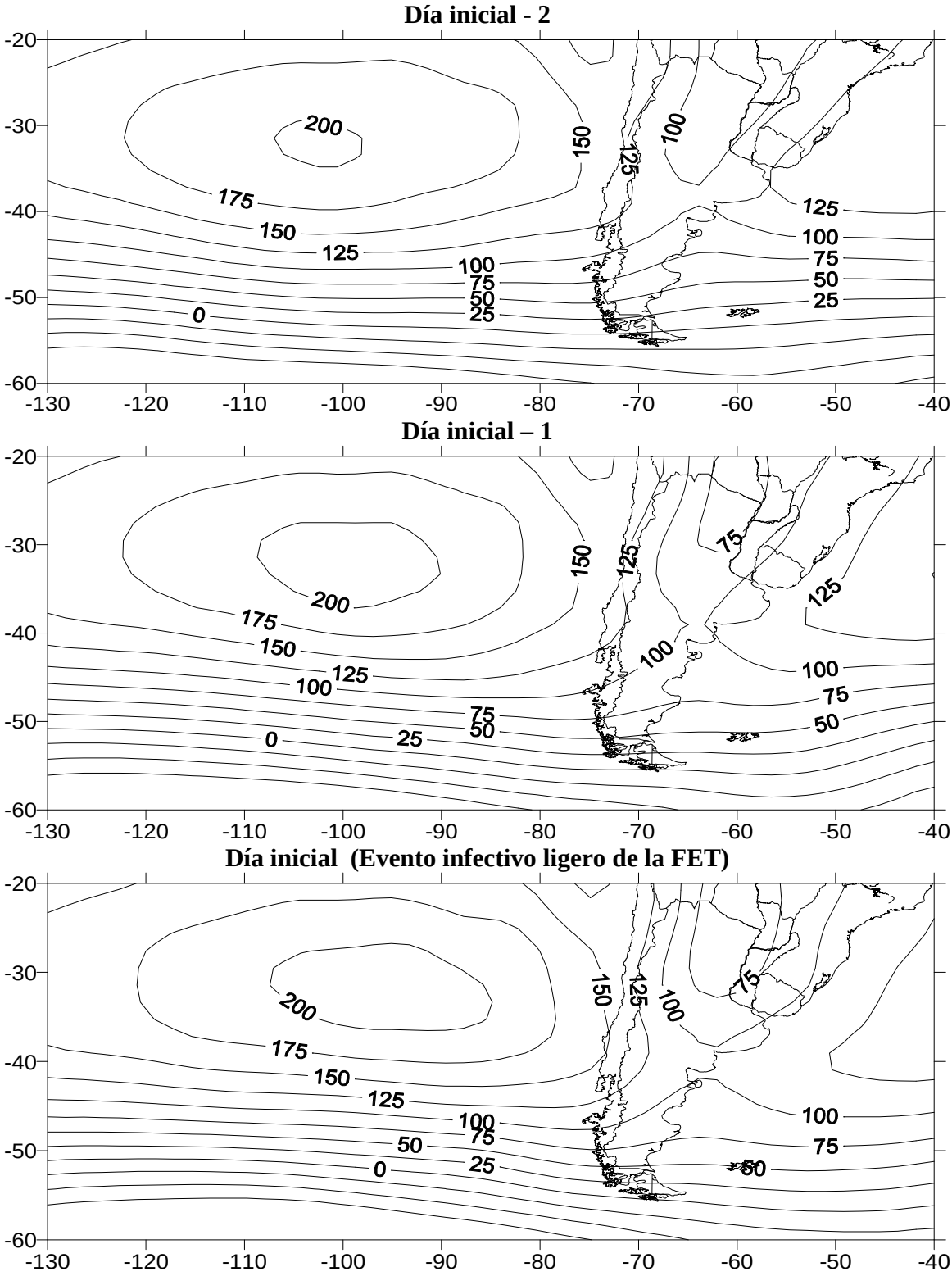

Figura II-17. **Tipo sinóptico A-lig Medio** resultante de promediar las 69 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de evento infectivo ligero de la FET y de los dos previos. Sitio: Balcarce

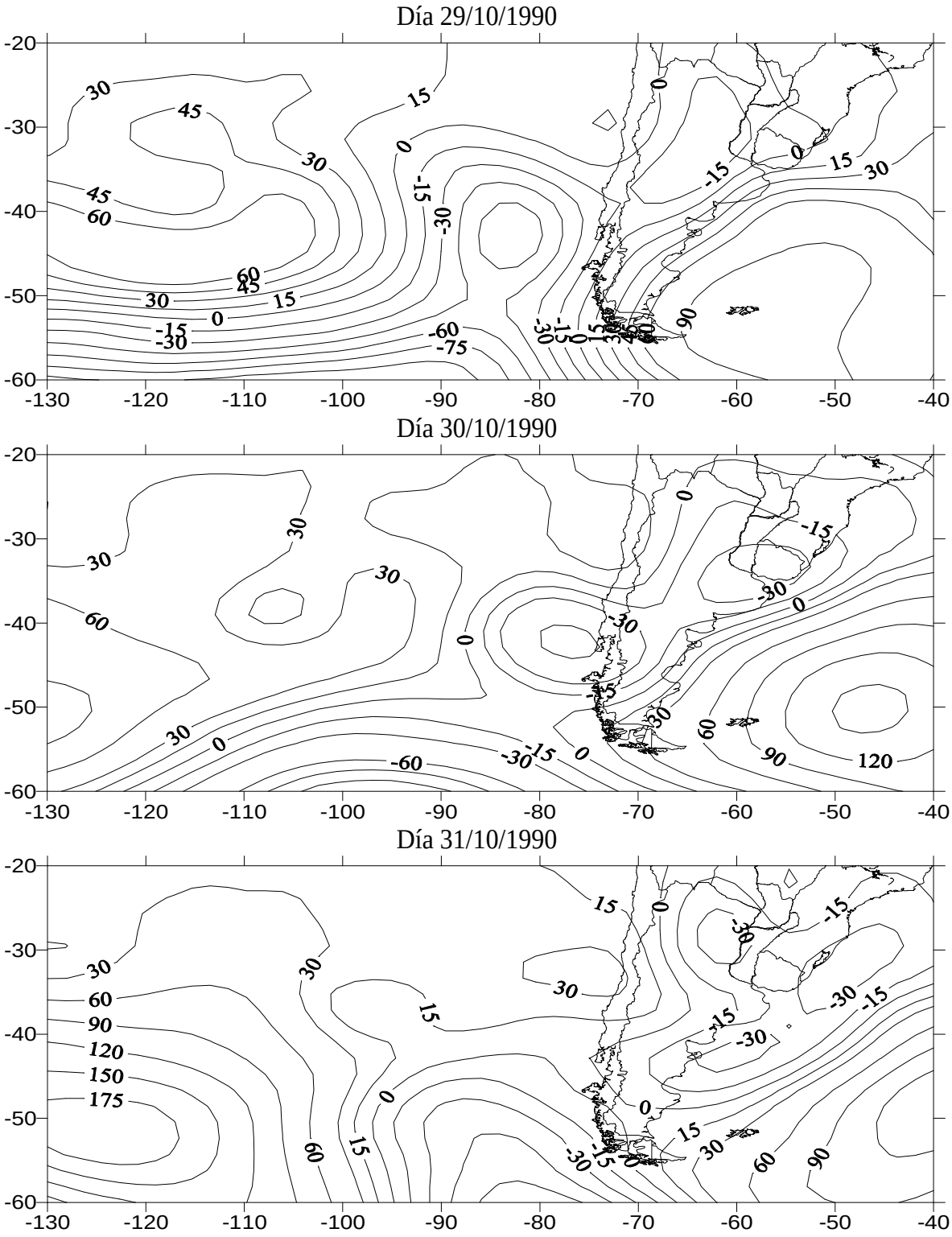

Figura II-18. Secuencia de mapas de **anomalías** de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa del día inicial (29/10/1990) de evento infectivo ligero de la FET y de los dos posteriores. Sitio: Balcarce

El tipo sinóptico A-sev relacionado a eventos severos (Figuras II-13 y II-14) describe la paulatina formación de un centro de baja presión en el centro norte de Argentina hasta abarcar al sur bonaerense (Balcarce). En el día inicial del evento infectivo severo de la FET (20/11/90) la altura geopotencial para 1000 hPa alcanza valores de 50 en Balcarce. Esta situación meteorológica involucra movimientos verticales ascendentes de aire que promueven la ocurrencia de precipitaciones (fuente primaria de períodos de mojado requerido para infecciones de la FET). La figura II-15 confirma la presencia de una fuerte anomalía (-60 hPa) en toda la provincia de Buenos Aires. En forma similar a lo descripto para los tipos sinópticos A-sev de Paraná y Pergamino, también para Balcarce es característica la presencia de dos fuertes anticiclones operando en el Pacífico y Atlántico. La fuerte actividad del centro de alta presión Atlántico produce advección de aire cálido y húmedo durante los dos días previos al inicio del proceso infectivo de la FET. La ocurrencia de largos períodos de mojado (91,7 % de los eventos severos con mojados >=a 30 h), asociado fuertemente a eventos severos, podría explicarse por la persistencia de anomalías negativas a neutras en el día inicial y los dos posteriores al 20/11/90.

La estructura característica del modelo sinóptico Tipo A relacionado a eventos infectivos ligeros de la FET (Figuras II-16 y II-17) fue la presencia de un área de baja presión sobre el centro-norte argentino, que no avanza significativamente sobre el sur bonaerense (anomalía neutra a positiva sobre Buenos Aires en el día inicial del evento infectivo: figura II-18). Los centros de alta presión del Pacífico y Atlántico están conformados hasta el día inicial del evento infectivo. La situación sinóptica permite el ingreso de aire del NE, sosteniéndose, en días posteriores al inicio del evento infectivo, condiciones de tiempo inestable (Figura II-18). Este proceso no podría explicar totalmente la ocurrencia de cortos períodos de mojado (67 % de los eventos infectivos ligeros tuvieron duraciones de mojado < 30 h) asociados a procesos de infección ligeros de la enfermedad.

2-1-3 CONCLUSIONES

Desde Paraná hacia el sur (Balcarce), progresivamente, la ocurrencia de eventos infectivos severos estuvo más fuertemente asociada a la observancia de mojados de larga duración (>= 30 h). En Balcarce el 91,7 % de los eventos infectivos severos

observaron mojados mayores o iguales a 30 h, contra 87,5 y 78,4 % en Pergamino y Paraná respectivamente. Seguramente, las temperaturas que acompañan a los lapsos de mojado son menores en Balcarce, en comparación a lo que ocurre en Pergamino y Paraná. Por ello, en el sur, solo largas duraciones de mojado permiten obtener niveles de severidad de la FET severos y compensar así una situación térmica menos benigna.

Para el centro norte de la región pampeana (Pergamino y Paraná) se pudieron identificar tipos sinópticos característicos asociados a la ocurrencia de eventos infectivos severos de la FET. Los campos medios de altura geopotencial se caracterizaron por la actividad de los centros anticiclónicos del Pacífico y Atlantico. En el día inicial y en los previos al evento infectivo, la actividad del anticiclón del Atlántico aseguró el ingreso de aire húmedo y cálido del N-NE sobre el centro-norte argentino, dominado por actividad ciclónica (alrededor de 75 hPa de altura geopotencial en el área de Paraná-Pergamino). Esta situación sinóptica que generó precipitaciones, no fue removida rápidamente en los días posteriores al inicio del evento infectivo, justificando la dominante ocurrencia de lapsos de mojado de la espiga de trigo de larga duración, asociada a niveles severos de infección. El tipo sinóptico A ligado a infecciones ligeras de la FET se caracterizó por presentar un anticiclón Atlántico más debilitado. La actividad ciclónica en el centro norte del país fue en este caso rápidamente desplazada hacia el norte, en los días posteriores al inicio del evento infectivo.

Para el sur de la región pampeana (Balcarce), los ataques severos de la FET coinciden con un desarrollo ciclónico que comprende al sur bonaerense, confirmado por la presencia de una fuerte anomalía negativa de altura geopotencial, cubriendo la provincia de Buenos Aires. Dicha anomalía se va retirando hacia el este en los días posteriores. Para ambos tipos sinópticos, A-sev y A-lig, vientos de dirección NE prevalecen al inicio de los eventos infectivos. En el tipo sinóptico A-lig, al inicio del evento infectivo de la FET, no se observa un pronunciado desarrollo ciclónico en el sur bonaerense.

2-2 INFLUENCIA DE SITUACIONES DE ACCIÓN BLOQUEANTE (SUR DE SUDAMÉRICA) SOBRE LA OCURRENCIA DE EPIDEMIAS DE LA FET

2-2-1 MATERIALES Y MÉTODOS

Indice de Fusarium predicho (IndFP%)

Para la serie de años 1971-2006 (N=36) y en tres sitios de la región pampeana (Paraná, Pergamino y Balcarce) se calculó el índice de Fusarium predicho de cada evento infectivo de la FET y el acumulado total, mediante el sistema de pronóstico fundamental-empírico desarrollado por Moschini *et al*. (2002) (Capítulo I). Para este estudio, como consecuencia de trabajos de validación (Moschini *et al.*, 2004; Carranza *et al.*, 2007), se realizaron pequeños cambios en la metodología original. El período crítico para la infección (PCI) para Balcarce fue definido como el lapso que se inicia 4 días previos a la plena espigazón y finaliza cuando se acumulan 450 grados día (se suman las temperaturas medias diarias >= 10°C). En Paraná y Pergamino se mantuvo la definición del PCI original: comienza 4 días previos a la fecha de plena espigazón y finaliza después de acumular 530 grados día (se acumulan las temperaturas medias diarias >=12°C). En los tres sitios, si el período de mojado es menor a 48 h y T es menor a 15°C, solo se considera el 90 % del valor del índice de Fusarium calculado para un mojado de 48 h.

En cada sitio se analizaron dos fechas de espigazón (media y temprana), definidas cada año cuando finaliza la acumulación de 1320 y 1250 grados día (T media base: 0°C), a partir del 1 de julio.

Identificación de situaciones de acción bloqueante

Un índice (I) zonal (m/s) para el nivel de 500 hPa (Alessandro, 2003 a b) calculado en tres longitudes (100°, 70° y 40°O) fue usado para identificar situaciones de acción bloqueante y/o días con vientos patagónicos del oeste debilitados, a lo largo del período crítico para la infección (PCI) con Fusarium. El índice zonal I fue definido como: $I=U(30°S)+U(60°S)-2U(45°S)$ II-1

donde U es la componente zonal del viento (m/s) para 500 hPa. Alessandro (2003 a b) establece una situación de acción bloqueante cuando I>0 (componente zonal a 45°S es anormalmente débil) por 5 o más días consecutivos. De todas formas un valor diario

individual positivo de I indica desde un debilitamiento anómalo de los vientos del oeste a 45°S hasta revertir su dirección al este.

Del trabajo de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) (NOAA), se obtuvieron las matrices de viento zonal diario (m/s) para el nivel de 500 hPa (resolución 2,5° x 2,5°), a escala planetaria. A través de un programa elaborado mediante el lenguaje del paquete estadístico SAS, de la matriz planetaria se extrajeron los valores de viento zonal en los puntos de latitud 30°S, 45°S y 60°S en sus intersecciones con las longitudes 100°, 70° y 40°O, con los cuales se calculó diariamente el índice zonal (I) para los meses de setiembre, octubre, noviembre, hasta principios de diciembre.

Análisis realizados

a) Días coincidentes con eventos infectivos de la FET con valores de I>0 e I<=0

Por sitio y por fecha de espigazón (media y temprana: 1320 y 1250 grados día) se calculó el número total y el porcentaje de días con valores de índice zonal (I, m/s) negativo y positivo, cuando ocurren eventos infectivos de la FET (para las longitudes 100°, 70° y 40°O). La fecha de espigazón (media o temprana) y longitud (100°, 70° o 40°O) que logró el mayor porcentaje de días con eventos infectivos con el índice zonal (I) positivo, fueron utilizados para los siguientes análisis.

b) Frecuencia de eventos infectivos de la FET clasificados por sus duraciones de mojado (24 hs a 72 h) con valores de I> 0 e I<= 0 (por sitio)

Para Paraná, Pergamino y Balcarce, se identificaron todos los eventos de infección de la FET correspondientes a duraciones de mojado que oscilaron desde las 24 h hasta 72 h (24, 27, 30, 33, 48, 51, 54, 57 y 72 h)

c) Frecuencia de períodos de días consecutivos (1 a >=8 días) con valores positivos del índice zonal de bloqueo, para las 36 campañas trigueras agrupadas por presentar valores anuales de índice de Fusarium predicho (IndFP %) < o >= al valor de la mediana de la serie histórica: 1971-2006 (por sitio).

d) Evolución del índice de Fusarium predicho acumulado (IndFP %) en los eventos infectivos ocurridos en el PCI del trigo en relación al Índice zonal (I), para las epidemias más intensas (predichas y observadas) ocurridas en cada sitio.

2-2-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Días coincidentes con eventos infectivos de la FET con valores de I>0 y <=0

En la tabla II-1 se presentan por sitio (Paraná, Pergamino y Balcarce) y para fechas de espigazón temprana (1250 grados día) y media (1320 grados día) la frecuencia de días y porcentaje con índice zonal positivo y negativo (aplicados a 100°, 70° y 40°O) respecto al total de días con ocurrencia de eventos infectivos de la FET.

Tabla II-1. Frecuencia y porcentaje de días con ocurrencia de eventos infectivos de la FET con índice zonal (I, m/s) positivo y negativo por longitud (100°, 70° y 40°O), por fecha de espigazón del trigo (temprana y media) y por sitio (Paraná, Pergamino y Balcarce)

	Fecha de Espigazón											
	Temprana (1250 grados día)						**Media** (1320 grados día)					
	I 100°O		**I 70°O**		**I 40°O**		**I 100°O**		**I 70°O**		**I 40°O**	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
Paraná												
I >0	77	43	126	**70**	69	39	81	45	127	71	66	37
I <=0	102	57	53	30	110	61	98	55	52	29	113	63
Pergamino												
I >0	83	41	142	**70**	83	41	75	39	124	65	70	37
I <=0	121	59	62	30	121	59	116	61	67	35	121	63
Balcarce												
I >0	94	38	167	**68**	76	31	77	35	144	66	73	33
I<=0	151	62	78	32	169	69	142	65	75	34	146	67
% Medio (I >0)		40,7		**69,7**		37		39,7		67,3		35,7
% Medio (I<=0)		59,3		30,7		63		60,3		32,7		64,3

En Paraná y Pergamino, el índice zonal (I) calculado en 70°O observó valores positivos (I>0) en el 70 % de los días con ocurrencia de eventos infectivos de la FET, mientras que en Balcarce lo fue en el 68 % de los días, para la fecha de espigazón temprana (1250 grados día). El porcentaje medio de días coincidentes con eventos

infectivos con I>0 más elevado (69,7 %) fue alcanzado por el índice zonal calculado en la longitud 70°O y la fecha de espigazón temprana (Tabla II-1). Alessandro (2003 a) calculó los valores medios de I (m/s) para las cuatro estaciones y las longitudes 100, 70 y 40°O, encontrando en la primavera el menor valor negativo que correspondió a 70°O. En esta longitud, la más alta frecuencia de valores positivos de I se observó en octubre, disminuyendo hacia noviembre. Esto explica la incipiente tendencia a observar menor frecuencia de eventos infectivos con I positivos en la fecha de espigazón media (período susceptible en el que se evalúan las variables meteorológicas es un poco más tardío) respecto a la temprana (Tabla II-1). La misma autora (Alessandro, 2003 b) estudió la recurrencia y la influencia que ejercen las situaciones de bloqueo en las longitudes 100°, 70° y 40°O sobre la temperatura y la precipitación en Argentina. De las tres longitudes, los valores diarios del índice zonal I tomado en 70° O presentaron correlaciones con temperatura significativamente distintas de cero y negativas, para los sitios estudiados por Alessandro (2003 b). Esta situación térmica asociada a I>0 en 70° O, podría ser positiva en el centro norte de la región pampeana, para mitigar el efecto desfavorable de temperaturas máximas muy altas sobre el proceso de infección de Fusarium, de frecuente ocurrencia en espigazón-antesis del trigo. Por otro lado, actuaría negativamente en sitios más fríos como Balcarce, pudiendo explicar preliminarmente el menor porcentaje de días con I>0 en el sur. Respecto al factor hídrico, Alessandro (2003 b), para el norte de la Provincia de Buenos Aires, encontró que la cantidad de días de lluvia con el índice zonal positivo a 70° O casi duplica el número de días lluviosos con índice negativo, estimulando los procesos infectivos de la FET al satisfacer el requerimiento de mojado. Sinópticamente, esto fue explicado por la ubicación preferencial de frentes entre Posadas y Corrientes (grandes gradientes térmicos), junto con el ingreso de humedad desde el Atlántico.

Cuando el índice zonal se procesó en 100°O y 40°O se invierte la tendencia (Tabla II-1), predominando en estos casos una fuerte circulación del oeste en 45°O, en coincidencia con los días con eventos infectivos de la FET, para los tres sitios de la región pampeana analizados. Concordantemente, Alessandro (2003 b) halló que, para las longitudes 100° y 40°O, los valores medios del índice zonal I para días con lluvia y sin lluvia resultaron negativos y equilibrados (leve sesgo hacia valores medios negativos en días de lluvia), desde Paraná hasta el SE de Buenos Aires. Contrariamente, para la longitud 70°O, estos valores medios fueron 2,3 (días con lluvia) y -8,2 (días sin lluvia) en Paraná y 1,7 (lluvia) y -9,7 (sin lluvia) en Mar del Plata. Cuando se analizó el

cociente entre la frecuencia relativa de días de lluvia en los días de intensa circulación del oeste (45°S) y la frecuencia relativa de días de lluvia bajo todo tipo de viento, Alessandro (2008) encontró valores de 0,9 y de 1 a 1,3 en 100° y 40°O respectivamente y sólo de 0,6 en 70°O, para el sector de la región pampeana que se analiza en esta tesis.

En los siguientes pasos del análisis se utilizará el índice zonal calculado en 70° O y la fecha de espigazón temprana (1250 grados día).

b) Frecuencia de eventos infectivos de la FET clasificados por la duración de mojado (24 h a 72 h) con valores > 0 y <= 0 de índice zonal (I), por sitio

Sitio Paraná

Se estimó un total de 97 eventos infectivos de la FET, de los cuales el 72 % presentaron valores del índice zonal (I) >0. Los eventos de infección coincidentes con mojados de larga duración (>=30 h), más estrechamente asociados a epidemias severas, observaron un moderado aumento en el porcentaje de eventos acompañados con I >0 (73 %), en comparación al 71 % para procesos infectivos de menos de 30 h (Figura II-19)

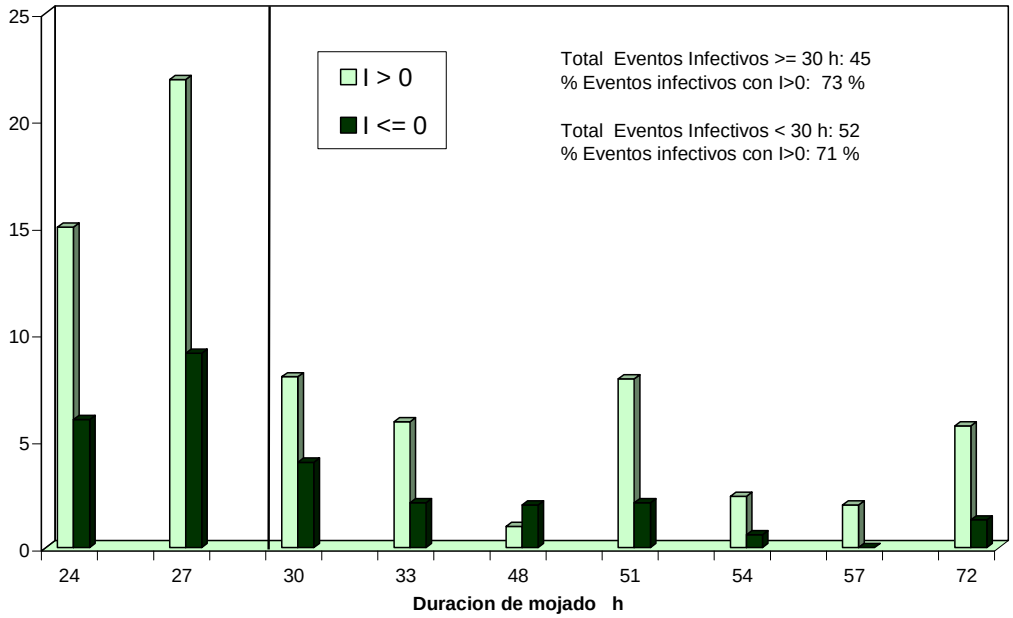

Figura II-19. Total de eventos infectivos de la FET clasificados por su duración de mojado (24 a 72 h) con valores positivos y negativos del índice zonal (I= U(30°S)+U(60°S)–2U(45°S)) en Paraná

Sitio Pergamino

En este sitio, el 68 % del total de eventos infectivos de la FET (108) presentaron valores positivos del índice zonal (I). El 69 % de los eventos de infección con más horas de mojado (>=30 h) estuvieron acompañados con I>0, muy similar al 66 % del total de eventos con menor duración de mojado (<30 h) (Figura II-20)

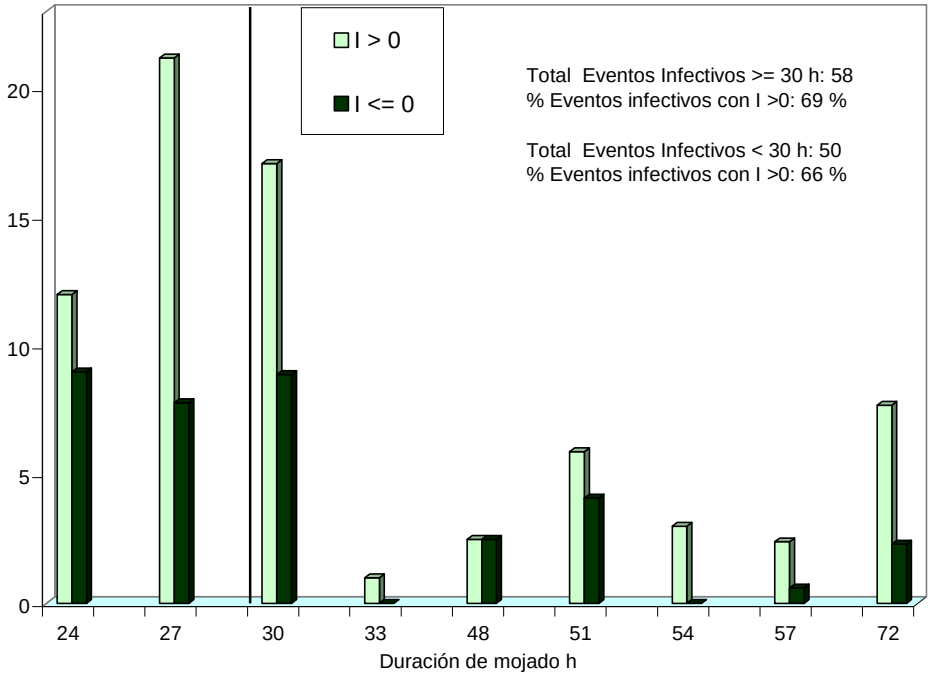

Figura II-20. Total de eventos infectivos de la FET clasificados por su duración de mojado (24 a 72 h) con valores positivos y negativos del índice zonal (I= U(30°S)+U(60°S)–2U(45°S)) en Pergamino

Sitio Balcarce

Se reconocieron 125 eventos infectivos de la FET, de los cuales el 63 % observaron valores positivos del índice zonal. Del total de eventos infectivos de la FET (59) con larga duración de mojado (>=30 h), el 69 % estuvieron acompañados de I >0. A diferencia de Pergamino y Paraná, este último valor fue marcadamente mayor al 58 % de eventos infectivos con I>0 asociados a eventos de corta duración (<30 h) (Figura II-21).

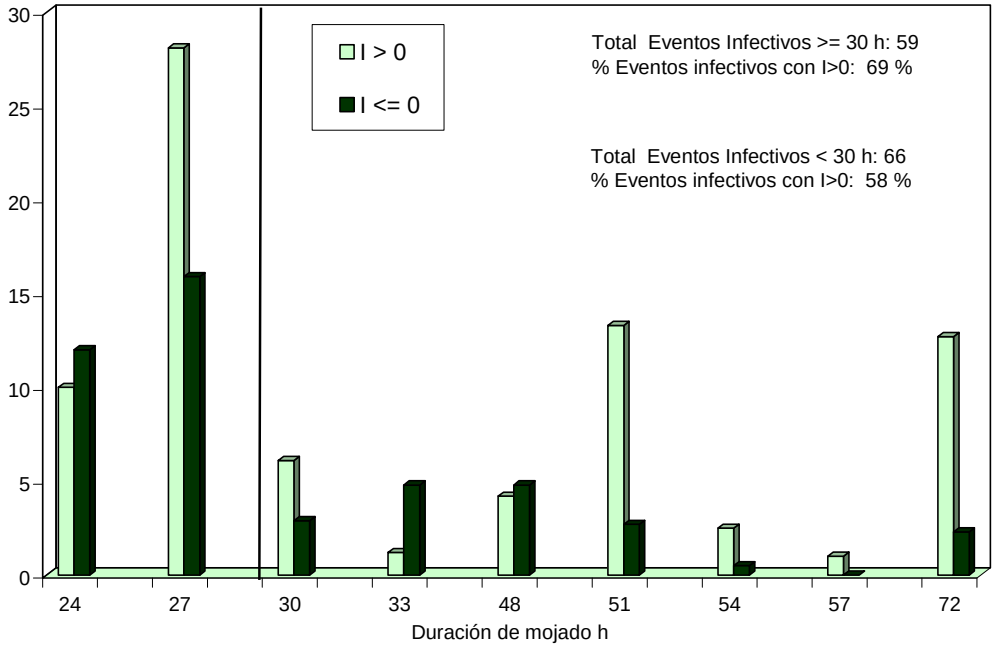

Figura II-21. Total de eventos infectivos de la FET clasificados por su duración de mojado (24 a 72 h) con valores positivos y negativos del índice zonal (I= U(30°S)+U(60°S)–2U(45°S)) en Balcarce. Serie analizada: 1971-2006

c) Frecuencia de períodos de días consecutivos (1 a >=8 días) con valores positivos del índice zonal (I) a lo largo del período crítico para la infección del trigo, para ciclos anuales con índices de Fusarium predichos acumulados (IndFP %) < y >= a la mediana (por sitio).

Sitio Paraná

En este sitio se reconocieron un total de 145 períodos de días consecutivos con valores de índice zonal (a 70°O) positivos, de los cuales solo el 42 % (61 períodos) se registraron en ciclos anuales con epidemias de la FET moderadas a severas (IndFP >= a la mediana: 4,98 %). Paraná se destacó por la alta ocurrencia de períodos de menos de 5 días (60%) con I>0 en coincidencia con años epidémicos ligeros. Alessandro (2003) estableció una situación de acción bloqueante cuando I>0 se registra por 5 o más días consecutivos, en estos casos el 48 % de los períodos observados acompañó a los ciclos anuales con niveles de enfermedad mayor o igual a la mediana (de la serie 1971-2006) (Figura II-22).

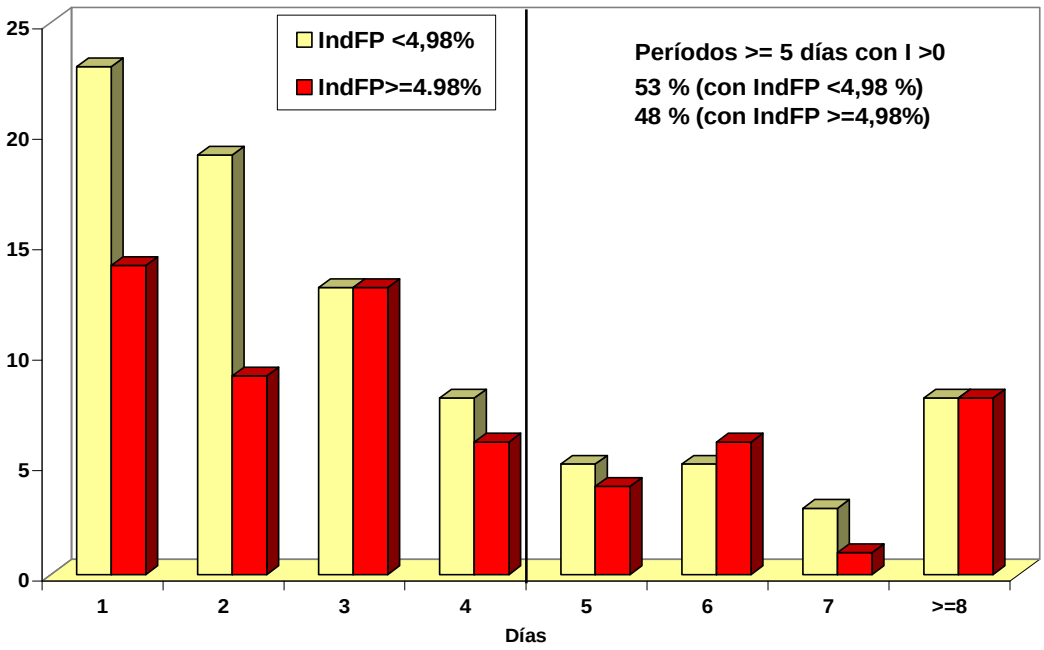

Figura II-22. Frecuencia de períodos de días consecutivos (desde 1 a >=8 días) con valores positivos del índice zonal (I) calculado a 70°O, para ciclos epidémicos anuales de la FET ligeros (IndFP < mediana:4,98 %) y moderados-severos (IndFP>=4,98 %). Sitio: Paraná, serie 1971-2006.

Sitio Pergamino

En este sitio se identificaron 152 períodos de días consecutivos con valores de I>0 (70°O), de los cuales 86 (57 %) se observaron en ciclos anuales con epidemias de la FET moderadas a severas (IndFP >= a la mediana: 2,99 %). A diferencia de Paraná, en Pergamino un mayor porcentaje (55 %) de los períodos de 5 o más días consecutivos con I>0 (situaciones de bloqueo) se registraron en los años con niveles de enfermedad mayor o igual a la mediana (serie 1971-2006) (Figura II-23).

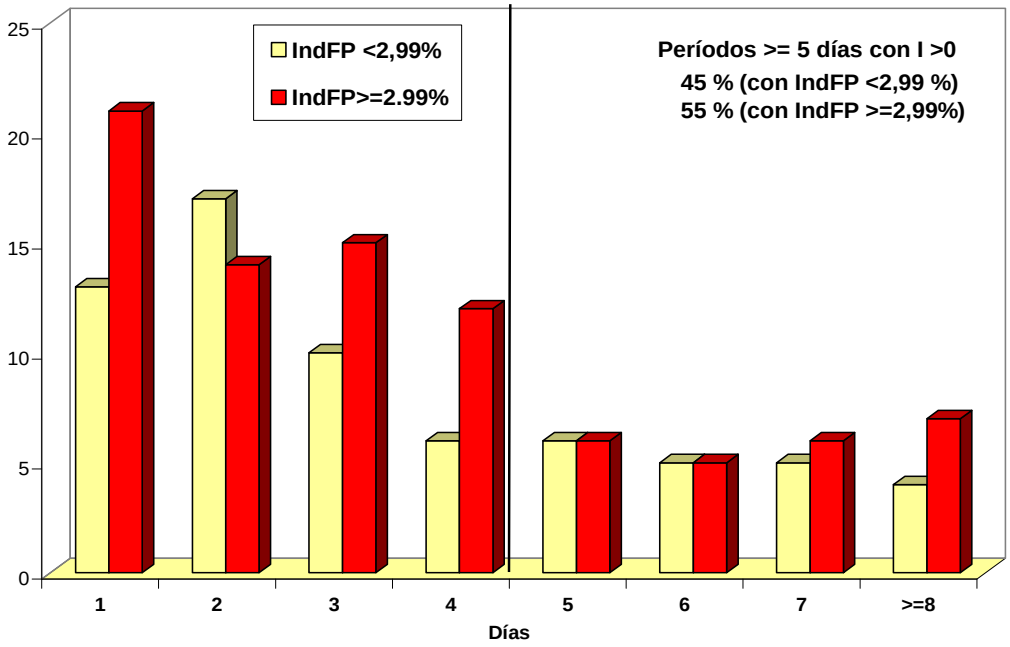

Figura II-23. Frecuencia de períodos de días consecutivos (desde 1 a >=8 días) con valores positivos del índice zonal (I) calculado a 70°O, para ciclos epidémicos anuales de la FET ligeros (IndFP < mediana:2,99 %) y moderados-severos (IndFP>=2,99 %). Sitio: Pergamino, serie 1971-2006.

Sitio Balcarce

En Balcarce se reconoció un total de 139 períodos de días consecutivos (desde 1 a >=8 días) con valores positivos de I (70°O), de los cuales 77 (55 %) se observaron en ciclos anuales con epidemias de la FET moderadas a severas (IndFP >= a la mediana: 2,97 %). En Balcarce el 61 % de los períodos de 5 o más días consecutivos con I>0 (asociado a situaciones de bloqueo) se registraron en los años con niveles de enfermedad mayor o igual a la mediana. Esta relación es la más alta, si se compara con los sitios del centro-norte de la región pampeana (Pergamino y Balcarce) (Figura II-24). En el sur, la anomalía térmica significativa y negativa asociada a valores positivo del índice zonal a 70 O, solo se puede compensar con eventos infectivos de la FET acompañados de largos períodos de mojado, a su vez asociado a la ocurrencia de situaciones de bloqueo >=5 días.

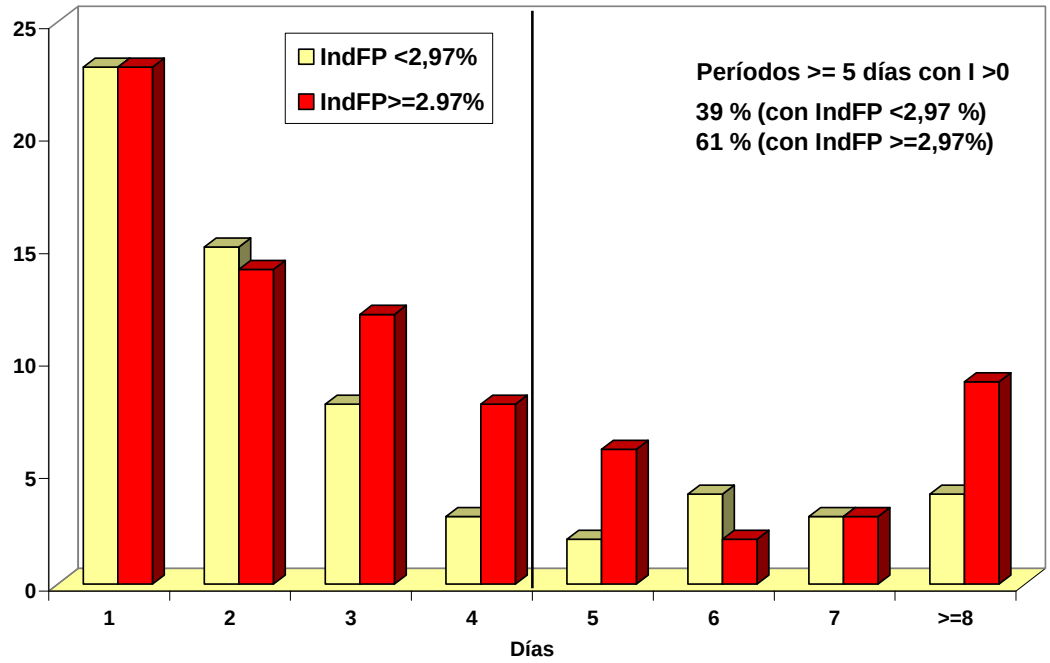

Figura II-24. Frecuencia de períodos de días consecutivos (desde 1 a >=8 días) con valores positivos del índice zonal (I) calculado a 70°O, para ciclos epidémicos anuales de la FET ligeros (IndFP < mediana:2,97 %) y moderados-severos (IndFP>=2,97 %). Sitio: Balcarce, serie 1971-2006.

d) Evolución del Indice de Fusarium predicho acumulado (IndFP %) en los eventos infectivos ocurridos en el período crítico para la infección del trigo en relación al Índice zonal (I) calculado a la longitud 70°O, para las epidemias más intensas (predichas y observadas) ocurridas en cada sitio.

Sitio Paraná

Para las más severas epidemias de la FET ocurridas en los 36 años analizados (1971-2006), se observó un neto predominio de valores de I (70°O) positivos, asociados a los eventos infectivos que ocurrieron en el período susceptible del trigo. El % de días con I>0 osciló desde el 69 % y 75 % en 1978 y 1985, al 83% en 1993 y 2000, hasta el máximo valor de 93 % en la epidemia de 2001 (Figura II-25).

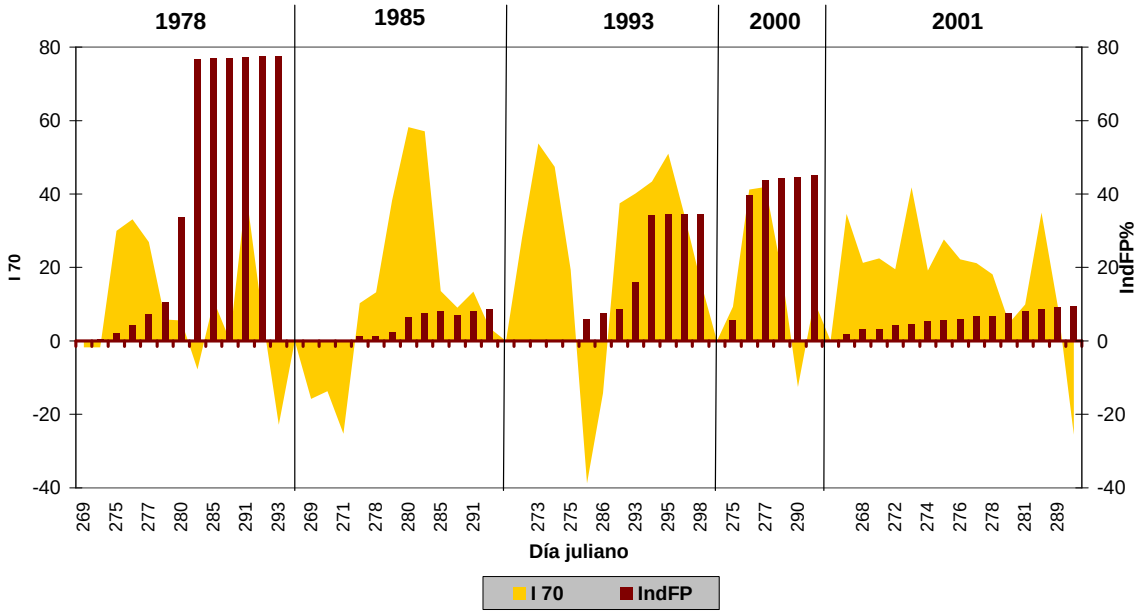

Figura II-25. Evolución del Indice de Fusariun acumulado (IndFP %) en los eventos infectivos ocurridos a lo largo del período susceptible del trigo en Paraná, junto a los correspondientes valores del índice zonal (I) a 70°O. Ciclos epidémicos moderados a severos: 1978, 1985, 1993, 2000 y 2001

Sitio Pergamino

Para las principales epidemias de la FET ocurridas en los 36 años analizados (1971-2006), sólo en 1978 el 55% de los días con eventos infectivos estuvieron acompañados de valores diarios del índice zonal (I a 70°O) positivos. En 1985, 1993 y 2001 se observó un neto predominio de valores de I positivos (92, 90 y 85 % de los días respectivamente (Figura II-26).

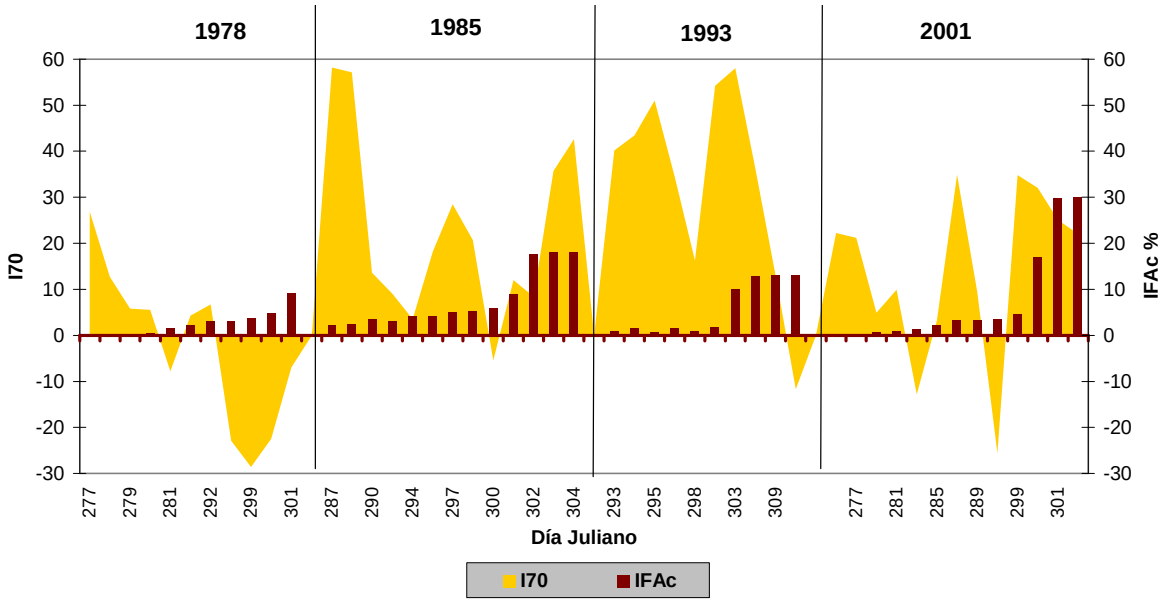

Figura II-26. Evolución del Índice de Fusariun acumulado (IndFP %) en los eventos

infectivos ocurridos a lo largo del período susceptible del trigo en Pergamino, junto a los correspondientes valores del índice zonal (I) a 70°O. Ciclos epidémicos moderados a severos: 1978, 1985, 1993 y 2001

Sitio Balcarce

En este sitio, para las principales epidemias de la FET ocurridas en los 36 años analizados (1971-2006) se observó un claro predominio de valores de I positivos, que oscilaron en 71 % de los días con eventos infectivos en 1985, a 78 % y 80 % en 2002 y 1978, hasta alcanzar el 100 % de los días en las epidemias de 2001 y 2004 (Figura II-27).

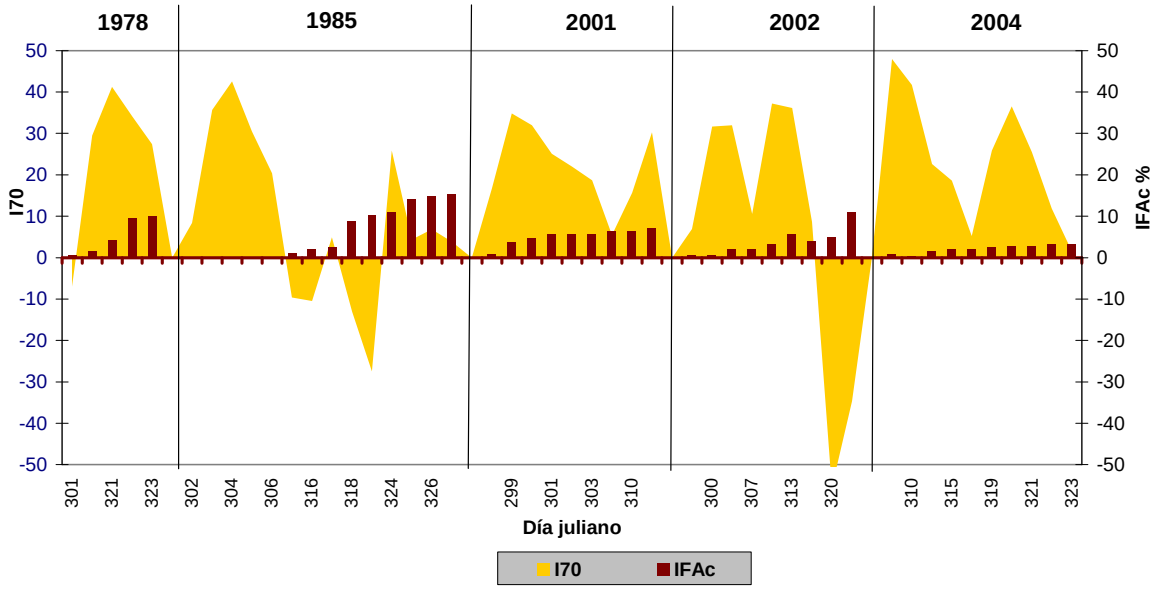

Figura II-27. Evolución del Índice de Fusariun acumulado (IndFP %) en los eventos infectivos ocurridos a lo largo del período susceptible del trigo en Balcarce, junto a los correspondientes valores del índice zonal (I) a 70°O. Ciclos epidémicos moderados a severos: 1978, 1985, 2001, 2002 y 2004

2-2-3 CONCLUSIONES

- El porcentaje medio de días coincidentes con eventos infectivos de la FET con I>0 más elevado (69,7%) fue alcanzado por el índice zonal calculado en la longitud 70°O y la fecha de espigazón temprana. Estudios previos que analizan el impacto de situaciones de acción bloqueante en esa longitud sobre las anomalías térmica-hídricas observadas en el este de la región pampeana, justifican la asociación enunciada precedentemente

-Se verifica una tendencia al incremento de la frecuencia de días con vientos del oeste debilitados en 45° S o sea valores del índice zonal I>0, acompañando a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET de más larga duración (lapsos de mojado>=30 h), especialmente en el sur (Balcarce). En Balcarce, por carácter transitivo, mayor frecuencia de I>0 se relaciona más fuertemente que en el centro-norte con la ocurrencia de infecciones severas de la FET, más asociadas a su vez con la observancia de mojados de larga duración (>=30 h) (conclusión de capítulo II, punto 2-1-3).

-Situaciones de acción bloqueante, definidas por la ocurrencia de 5 o más días consecutivos con I>0, se registraron con más frecuencia en los ciclos epidémicos anuales más severos, especialmente en el sur de la región pampeana (Balcarce). Otros trabajos han definido la existencia de una anomalía térmica significativa y negativa asociada a valores positivos del índice zonal a 70° O, que puede hacer decrecer el nivel de enfermedad, sobre todo en el sur bonaerense. Por ello se verifica que sólo largos períodos de mojado, acompañando a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET, pueden compensar el efecto térmico depresor sobre el progreso epidémico.

- Para las epidemias más severas según registros históricos y confirmadas por los modelos predictivos, se observó un neto predominio de valores de I (70°O) positivos, asociados a los días con ocurrencia eventos infectivos de la FET en el período susceptible del trigo. Los valores inferiores se dieron en la campaña 1978 en Pergamino y Paraná, donde el 55% y 69 % de los días con eventos infectivos estuvieron acompañados de valores diarios de I>0. En las otras epidemias severas, en todos los sitios se observaron mayores porcentajes, alcanzando máximos que oscilaron desde 92 % en 1985 en Pergamino, a 93 % en la campaña 2001 de Paraná, hasta el 100 % de los días en ciclos epidémicos de 2001 y 2004 en Balcarce.

- Alessandro (2003 a) comprobó estadísticamente el traslado de la acción bloqueante hacia el este, cuando analizó el fenómeno desde los 100°O hasta 40°O de longitud. También señaló que la detección temprana de situaciones bloqueantes por medio de modelos numéricos de pronóstico meteorológico disponibles, podría ser muy útil para diagnosticar y pronosticar la temperatura y precipitación en Argentina (Alessandro, 2003 b). Dada la fuerte relación encontrada en esta sección entre la ocurrencia de eventos infectivos de la FET con dichos factores hídrico-térmicos, su predicción también será de utilidad para estimar el impacto sobre la enfermedad del trigo.

2-3 SITUACIONES DE ACCIÓN BLOQUEANTE EN RELACIÓN A LOS TIPOS SINÓPTICOS DOMINANTES ASOCIADOS A EVENTOS INFECTIVOS DE LA FET

2-3-1 MATERIALES Y MÉTODOS

En el punto 2-1 se reconocieron todos los eventos infectivos severos de la FET, agrupados en el tipo sinóptico A-sev correspondiente a Paraná (n=32), Pergamino (n=31) y Balcarce (n=19). Por sitio, para el total de eventos infectivos incluidos en tipo sinóptico A-sev dominante, se calculó la frecuencia porcentual de ocurrencia de índices zonales (I) positivos en lapsos de un día (día juliano inicial (DJi) del evento infectivo), dos días (DJi y el siguiente) y tres días (DJi y los dos posteriores). El índice zonal I (ecuación II-1) se calculó para tres longitudes: 100°, 70° y 40° O. Un valor diario individual positivo de I indica desde un debilitamiento anómalo de los vientos del oeste a 45°S hasta revertir su dirección al este.

Seguidamente, para el sitio que presentó la mayor frecuencia porcentual de ocurrencia de índices zonales I positivos, se buscó identificar y describir la posible presencia de situaciones de acción bloqueante y/o debilitamiento de los vientos del oeste patagónicos, en mapas de anomalía media de altura geopotencial para el nivel de 1000 hPa, del día inicial del evento infectivo severo y de los dos previos. A partir de los reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), disponibles en la página Web de la NOAA, se obtuvieron las matrices de anomalía de altura geopotencial diaria para 1000 hPa (resolución 2,5° x 2,5°), a escala planetaria. De cada matriz correspondiente al día inicial de cada evento infectivo y de los dos días previos, se extrajo el sector del hemisferio sur a analizar:130° a 40° W y 20° a 60° S (programa realizado con el lenguaje del paquete estadístico SAS).

2-3-2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla II-2 se observa la frecuencia porcentual de días con I positivos en las tres longitudes analizadas (100°, 70° y 40° O, para los días (día inicial y los dos posteriores) con eventos infectivos severos de la FET, identificados en Paraná, Pergamino y Balcarce para el tipo sinóptico A-sev.

Tabla II-2. Porcentaje de días con índices zonales positivos (I100, I70, I40) para los eventos infectivos severos (lapsos de 24, 48 y 72 h a partir del día inicial del evento) agrupados en el tipo sinóptico dominante, por sitio (Paraná, Pergamino y Balcarce).

Sitio		I 100	I 70	I 40
Paraná	DJi (24 h)	41	**50**	16
	DJi + 1 día (48 h)	42	**55**	16
	DJi + 2 días (72 h)	44	**54**	22
Pergamino	DJi (24 h)	42	**61**	52
	DJi + 1 día (48 h)	39	**60**	52
	DJi + 2 días (72 h)	39	**59**	58
Balcarce	DJi (24 h)	**32**	15	5
	DJi + 1 día (48 h)	26	**39**	3
	DJi + 2 días (72 h)	25	**42**	4

I=U(30°S)+U(60°S)–2U(45°S), donde I es el índice zonal y U es la componente zonal del viento (m/s) para 500 hPa. DJi: día juliano inicial del evento infectivo severo

El índice zonal I calculado en 70°O obtuvo las más altas frecuencias de valores positivos. En Pergamino el 61% de los días de inicio de los eventos infectivos severos estuvieron acompañados de I positivos. En Paraná y en Balcarce la frecuencia de I positivos persiste y se incrementa cuando se describen lapsos de 48 h y 72 h, a partir del día de inicio del evento infectivo. En Balcarce el incremento en la frecuencia de situaciones de acción bloqueante es marcado cuando se analizan períodos de 48 y 72 h (39 y 42 %) en la longitud 70°O, comparado al 15 % de las 24 h iniciales.

El análisis prosiguió con Pergamino, sitio en el cual se presentó la mayor frecuencia porcentual de ocurrencia de índices de bloqueo positivos (día inicial de cada evento infectivo severo y en los dos posteriores). En Pergamino se agruparon 31 secuencias de mapas de altura geopotencial altamente correlacionadas ($r>0,7$). En la figura II-28 se observa la secuencia de mapas de anomalía media de altura geopotencial en el nivel de 1000 hPa, para el día inicial del evento infectivo de la FET severo y de los dos previos (N= 31). Un sistema de baja en el Pacífico Sur comienza a moverse hacia el NE, dos días antes del inicio del evento infectivo. Este avance en dirección NE se ve favorecido por la presencia del anticiclón del Atlántico expandido hacia latitudes altas (50°S). La baja en la zona centro-NE continental de Argentina se fortalece en el día previo y en el inicio del evento infectivo severo de la FET en Pergamino.

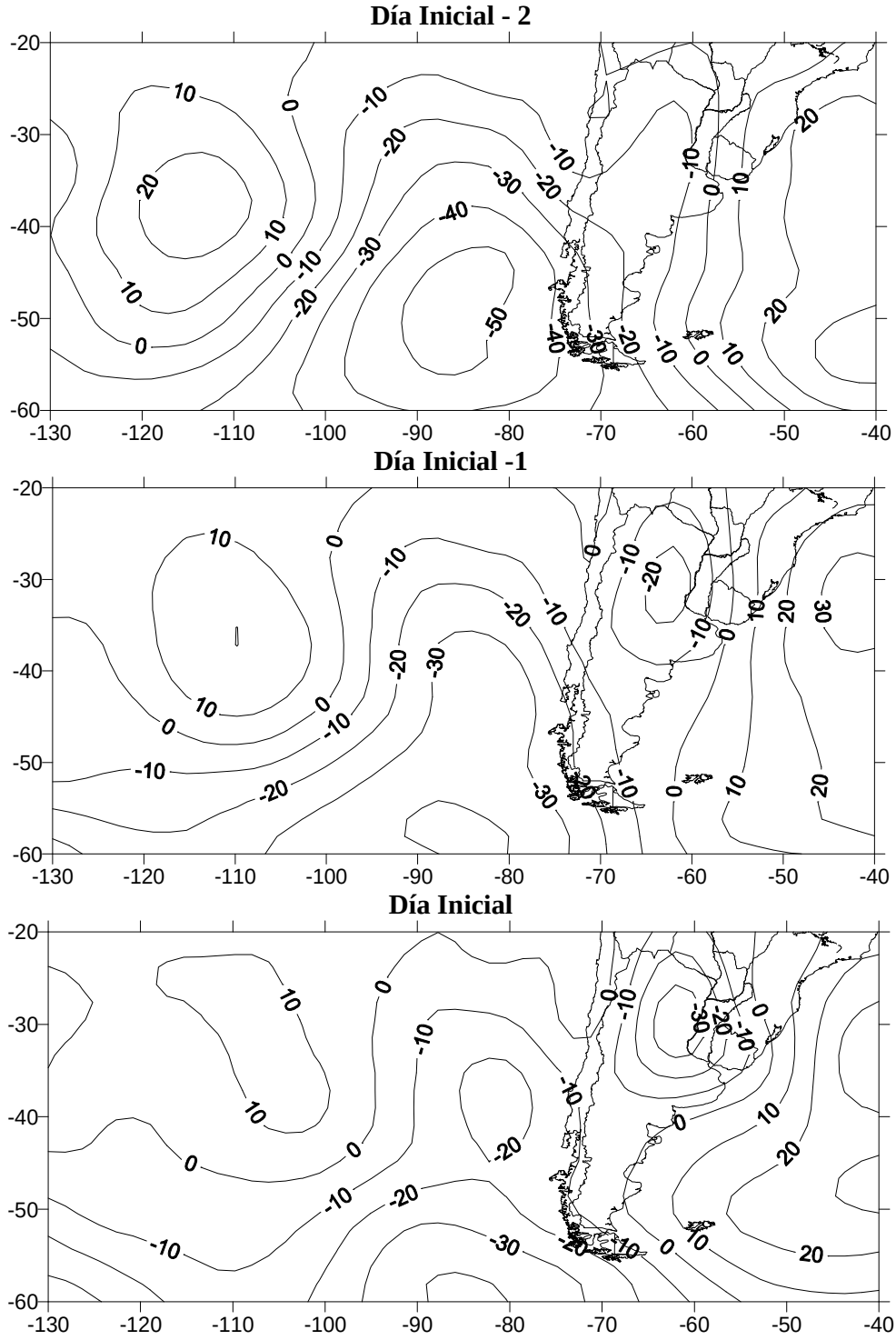

Figura II-28. Secuencia de mapas de anomalía **media** de altura geopotencial para 1000 hPa resultante de promediar las 31 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7) del día inicial de evento infectivo severo de la FET y de los dos previos. Sitio: Pergamino

También claramente los vientos patagónicos del oeste son nulos, siendo dominante la circulación de dirección NE. La configuración se completa en el día inicial de un evento severo de infección de la FET con la presencia de una zona de baja

presión en el centro-NE de Argentina y una de alta presión en latitud 50°S y longitud 40°O.

2-3-3 CONCLUSIONES

- El índice zonal I calculado en 70°O y para Pergamino, en los días con ocurrencia de eventos infectivos de la FET severos, obtuvo la más alta frecuencia de valores positivos (alrededor de 60 %).
- La frecuencia de I positivos persiste y se incrementa cuando se analizan lapsos que se se extienden desde 24 h a 72 h, a partir del día de inicio del evento infectivo, en Paraná (51 a 54%) y Balcarce (15 a 42 %)
- En el día inicial del evento infectivo severo de la FET, el mapa medio de anomalía en el nivel de 1000 hPa se caracteriza por la presencia de una dominante circulación de dirección NE en Patagonia, el anticiclón del Atlántico expandido hacia latitudes altas (50°S) y una fuerte baja presión en la zona centro-NE de Argentina.

Capítulo III

PREDICTORES METEOROLÓGICOS EN LA ESCALA HEMISFÉRICA ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE NIVELES DE INCIDENCIA DE LA FET, EN ÁREAS HOMOGÉNEAS DE LA REGIÓN PAMPEANA.

1 INTRODUCCIÓN

Las condiciones atmosféricas presentan fluctuaciones irregulares en un amplio rango de escalas temporales, desde semanales, asociadas con el pasaje de perturbaciones en latitudes medias, a escalas mayores causantes de variabilidad intra-estacional (26-60 días), inter-anual e inter-decadal (Garreaud *et al.*, 2009). Niveles de expresión epidémica en cultivos relevantes se pueden asociar a la variabilidad climática generada por fenómenos de crecientes escalas espacio-temporales. La identificación de predictores meteorológicos en dichas mayores escalas podría sustentar la elaboración de pronósticos estacionales de niveles esperables de expresión de enfermedades, con antelación al período susceptible del cultivo y/o toma de decisión de control químico. La disponibilidad de dichos pronósticos podría aportar elementos útiles al manejo racional estratégico y táctico de muchos patosistemas.

En primer término se analiza El Niño Oscilación del Sur (ENOS), por constituir el fenómeno oceánico-atmosférico que causa variabilidad climática interanual más importante. Walker (1932) descubrió la existencia de una fluctuación interanual irregular que llamó Oscilación del Sur (OS), que involucra cambios en el régimen de lluvia y viento sobre los océanos Pacífico tropical e Indico. Bjerknes (1969) asoció la OS con fluctuaciones en la temperatura de superficie del sector oriental ecuatorial del océano Pacífico. El fenómeno ENOS reconoce una fase neutral y dos fases extremas El Niño (calentamiento superficial del mar en el centro-este del Pacífico ecuatorial y presiones mayores a la media en el Océano Indico y Australia) y La Niña (procesos en sentido contrario al de años El Niño). El fenómeno ENOS afecta sistemas de circulación atmosférica ubicados en sitios remotos del planeta (teleconexiones), originando anomalías térmicas y del régimen de lluvias, entre otros. En América del Sur se registran numerosos antecedentes que señalan asociaciones entre las fases extremas del

ENOS y anomalías de precipitación (Pisciottano *et al*, 1994; Tanco y Berri, 1996; Vila y Grondona, 1996; Grimm *et al.*, 2000; Farías *et al.*, 2003; Silvestri, 2005) y precipitación-temperatura (Garreaud *et al.*, 2009). La probabilidad de ocurrencia de períodos secos (derivados de probabilidades condicionales de lluvia: cadenas de Markov de primer orden y tendencia estacional) resultó hasta 30 % menor en años con eventos El Niño respecto a años La Niña (en cuatro sitios de La Pampa). Estas diferencias se concentraron claramente en la primavera tardía (Moschini *et al*., 1997). En el mismo sentido, Tanco y Berri (1996) señalaron que en Noviembre-Diciembre más del 60% de la región pampeana recibe lluvias por debajo de la normal en años con eventos La Niña. Utilizando regresión logística, Farías *et al*. (2003) desarrollaron métodos para pronosticar niveles de precipitación en el período Mayo-Agosto, en el centro de Chile. En este caso el predictor fue la anomalía media bimensual (enero-febrero y marzo-abril) de la temperatura de superficie del mar en la región Niño3 del Pacífico. Para la región pampeana y NE de la Argentina, Flamenco *et al*. (2002) desarrollaron modelos estadísticos (análisis de componentes principales, técnicas de regresión no lineal y lineal) de pronóstico estacional de lluvias (bimestres octubre-noviembre, noviembre diciembre, enero-febrero y marzo-abril) en base a predictores climáticos globales.

Otro fenómeno que se analiza es el Modo Anular del Sur (MAS) u Oscilación Antártica. Este constituye el principal modo de variabilidad de la circulación extra tropical en el Hemisferio Sur y es caracterizado por estructuras zonal-simétricas o anular, con perturbaciones de altura geopotencial de signos opuestos en Antártida y en una banda circundante zonal centrada cerca de los 45° S de latitud. El MAS es barotrópico y aparece a lo largo del año en la tropósfera y puede amplificarse hacia la estratósfera en la primavera tardía Varios estudios verificaron la influencia del MAS sobre la precipitación en varias regiones del planeta. Silvestri y Vera (2003) definieron la fuerte influencia del MAS sobre la precipitación en el sudeste de Sudamérica, especialmente durante el invierno y primavera (con signo opuesto). En la primavera los autores encontraron que la actividad del MAS produce una fuerte modulación de la señal ENOS sobre la precipitación del sudeste sudamericano. Para el oeste de Sudáfrica, Reason and Rouault (2005) observaron que 6 (6) de los 7 (8) inviernos más lluviosos (más secos) durante 1948-2004 ocurrieron durante fases negativas (positivas) del MAS. Garreaud *et a*l. (2009) encontraron una relación negativa significativa entre un índice del MAS (primer componente principal de las anomalías de altura geopotencial en 850 hPa al sur de 20°S) y la precipitación (media anual) al sur de los 40°S (Chile) y la costa

subtropical este de Sudamérica. La región pampeana observa correlación negativa en SE y NO, zonas neutras a positivas en el NE de La Pampa. También estos autores observaron un significativo calentamiento al sur de 40°S asociado con la fase positiva del índice del MAS, máximo en el verano austral. Se nota en cambio un enfriamiento en el centro-norte de la región pampeana. En relación al uso de datos de Reanálisis NCAR-NCEP (Kalnay *et al.*, 1996) en muchos estudios, Gillett *et al*. (2006) señala que los mismos resultan imprecisos en el HS, particularmente en latitudes altas. Marshall (2003) encontró limitaciones en la descripción de la presión de superficie del mar Antártico a partir de dicha información, por ello definió un índice MAS basado en datos de estaciones de superficie. Gillett *et al.* (2006), usando el índice de Marshall, calculó coeficientes de regresión de precipitación media mensual versus el índice MAS en el HS. Estos autores no encontraron una respuesta robusta en la media anual de lluvia al norte de 40° S, como fuera definido por Silvestri y Vera (2003).

Trabajos previos han demostrado la utilidad de contar con una predicción temprana de las fases extremas del fenómeno ENOS para ajustar, con bases racionales, decisiones de manejo como fecha de siembra, cultivo-variedad a implantar y nivel tecnológico a utilizar. Magrín *et al*. (1996) encontraron, para la serie 1989-1993, que el 66% de los años con fase El Niño (16 sobre 24) observaron rindes de maíz superiores a la media en la región pampeana. Por el contrario, el 75% de los años con episodios La Niña (12 sobre 16) experimentaron rendimientos inferiores a la media histórica. Varios estudios asociaron el fenómeno ENOS con las variaciones interanuales de enfermedades fúngicas en cultivos. Scherm y Yang (1995) mostraron que la asociación entre el índice de Oscilación del Sur (IOS) y la roya amarilla en trigo tiene una periodicidad de 2-10 años en China y para la roya del tallo en Estados Unidos de 6-8 años. En Australia se propusieron sistemas de alarma contra la presencia de aflatoxinas en maní (Wright and Hansen, 1997) y ergot (*Claviceps spp*) en sorgo (Meinke and Ryley,1997), basados en el IOS. Zhao and Yao (1989) pudieron predecir satisfactoriamente con 4 meses de anticipación epidemias de fusariosis de la espiga de trigo (FET) en el este de China, midiendo la temperatura de superficie en el océano Pacífico central (R^2=0,86). Esta asociación fue explicada por el adelanto del monzón estival dependiente del fenómeno ENSO sobre el este de Asia, incrementando las lluvias y los eventos de infección de la FET. Para varios sitios de la región pampeana se analizó la relación existente entre el fenómeno ENOS y varias enfermedades del cultivo de trigo (Moschini *et al*., 1999; Moschini, 2006; Moschini and Bischoff, 2007). Hacia el sur de la región pampeana, el

fenómeno ENOS realizó el aporte más significativo para explicar la variabilidad en los niveles anuales de incidencia de la FET (Moschini *et al*., 2008). En el sur de Brasil, el incremento de las lluvias primaverales unido a anomalías cálidas en el océano Pacífico tropical fue asociado con una más alta frecuencia de epidemias de la FET, después de la década del 80 (Del Ponte *et al*., 2009). También encontraron que el riesgo epidémico aumentó en los trigos de siembra más tardía, en las últimas décadas.

Se han realizado numerosos trabajos que identifican tipos de circulación atmosféricos en escala planetaria asociados con anomalías en las distribuciones de lluvias y vapor de agua en la región pampeana (Labraga *et al*., 2003), utilizando la base de datos NCAR-NCEP Reanalysis (Kalnay *et al.,* 1996). Analizando promedios mensuales de presión al nivel del mar (reanálisis), Camilioni *et al*. (2005) observaron un incremento de la intensidad y frecuencia de vientos de dirección este, probablemente asociado al desplazamiento hacia el sur del Anticiclón Subtropical del Atlántico Sur en las últimas décadas. Estos trabajos sustentan la idea de incluir índices que analicen la dominancia de circulación meridional de S-SO o N-NE en respuesta a la potencia y ubicación relativa de los anticiclones subtropicales del Atlántico y Pacífico Sur. A partir de la observación de anomalías térmico-hídricas en Argentina asociadas a situaciones de acción bloqueante en el Sur de Sudamérica y/o debilitamiento de los vientos del oeste en Patagonia (Alessandro, 2003 a; Alessandro, 2003 b; Alessandro, 2008), en el Capítulo II se estudió el impacto de dicho fenómeno sobre la expresión de la FET, durante el período susceptible para la infección. Para alimentar pronósticos estacionales de la enfermedad, se analizará un índice zonal del fenómeno, procesado en un lapso previo al período crítico de infección y/o a la toma de decisión de control químico.

El objetivo de este capítulo fue identificar predictores meteorológicos en la escala hemisférica asociados a la ocurrencia de niveles epidémicos de la FET (estimados por sistema de pronóstico empírico) en áreas homogéneas de la región pampeana, cuantificando sus efectos por medio de ecuaciones de regresión logística.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Definición de áreas homogéneas (AH) (Método de Lund, 1963)

Los valores anuales de incidencia de la FET (IncFET%) se estimaron por la ecuación III-1 (señalada en capítulo I como I-1) desarrollada por Moschini and Fortugno (1996) en Pergamino:

IncFET(%)=20,37 + 8,63 NP2 - 0,49 GD ***III-1***

donde NP2: número de períodos de 2 días con registro de lluvia y humedad relativa >81% (día 1) y una humedad >= 78 % (día 2). GD: acumulación diaria del residual >26 °C y <9 °C en temperatura máxima y mínima respectivamente. Las variables se calculan en el lapso (PCI) que va desde la aparición de las primeras espigas con anteras (8 días previos a plena espigazón) hasta acumular 530 grados día (acumulación de las temperatura medias diarias > a 0°C) (26 a 32 días). Al norte de Pergamino la ecuación III-1 sólo cambia en la variable GD, la cual acumula el residual diario de temperatura máxima superior a 30°C. Hacia el sur, la variable GD tiene umbrales de 11°C y 30°C (temperatura mínima y máxima) y el PCI se extiende hasta acumular 450 grados día. Las variables meteorológicas de la ecuación III-1 fueron procesadas a partir de registros diarios de la serie 1971-2006, para 37 estaciones del SMN e INTA en la región pampeana. Se fijaron fechas de espigazón media por sitio resultantes de completar 1320 grados día (suma de temperaturas medias diarias >0°C) desde el 1 de julio. Cada vector de 36 valores anuales de IncFET de un sitio (Lund, 1963) fue correlacionado (r: coefic. de correlación de Pearson) con todos los otros vectores de las estaciones meteorológicas restantes. En primer lugar se identificó el sitio con el mayor número de correlaciones (>=0,80 o >=0,7). Los sitios que integraron a la primera área homogénea (AH) se retiraron y con los restantes se fue realizando el mismo procedimiento.

Categorización de la variable respuesta

Por AH y por año se calculó la mediana de la IncFET a partir de los valores estimados en las estaciones meteorológicas pertenecientes a cada AH. Los valores mediana anuales de todas las estaciones de cada AH se categorizaron en función de umbrales: epidemia severa (IncFET>39%, moderada (>=16,9% y <=39% y ligera a nula (<16,9%). Los umbrales correspondieron a los percentiles 85% (IncFET=39,0%) y 65% (IncFET=16,9%) respecto a los 1332 valores de IncFET estimados en los 37 sitios y los 36 años.

Variables meteorológicas regresoras

La variación en los niveles de incidencia de la FET fue analizada en relación a la variabilidad climática estacional e interanual asociada a los siguientes fenómenos de influencia hemisférica y/o planetaria:

a) El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

- Índice Niño Océanico (INO): calculado mensualmente como la media de 3 meses de la anomalía de temperatura de superficie del mar en la región Niño 3.4 (5°-5°S, 120°-

170°O, serie base: 1971-2000 (Fuente:www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml).

- Índice de Oscilación del Sur (IOS) (Fuente: NCC: Nacional Climate Center, Australia): para su cálculo se utilizó la fórmula de Troup (1965):

$$IOS=APr(Tahiti)-APr\ (Darwin)/DS_{dif} *10$$

siendo APr la anomalía de presión: media mensual menos media serie 1933-1992 y DS_{dif}: desvío estándar de la diferencia (Fuente:www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml

b) Modo Anular del Hemisferio Sur (MAS) u Oscilación Antártica: Marshall (2003) define al índice como la diferencia media mensual entre la anomalía media de la presión a nivel del mar en seis estaciones cercanas a 40°S y la correspondiente a seis estaciones próximas a 65°S (Tabla de valores mensuales:www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html

Para los 3 índices (INO, IOS y MAS) se usaron desde valores mensuales hasta medias semestrales.

c) Índices que analizan dominancia de circulación meridional de S-SO o N-NE (valores medios del mes de agosto y de setiembre):

- Dhgp1: diferencia entre los valores mensuales de altura geopotencial a 1000 hPa (hgp) Del trabajo de reanálisis NCEP/NCAR de Kalnay *et al.* (1996) se obtuvieron matrices planetarias de hgp diaria a 1000 hPa, resolución 2,5° x 2,5° de los puntos 100°O y 45°O, para la latitud 40°S.

- Dhgp2: diferencia entre los valores mensuales de hgp a 1000 hPa de los puntos 100°O y 60°O para la latitud 40°S. También se analizó en las latitudes: 37,5°S, 35°S y 32,5°S.

- Hgp1s; Hgp2s: hgp a 1000 hPa en los puntos de coordenadas 40°S-45°O y 40°S-100°O respectivamente, de setiembre.

d) Índice (I) zonal (Alessandro, 2003): se usó para identificar las situaciones de acción y o debilitamiento de los vientos del oeste a 45 S (I>0) bloqueante a 100°, 70° y 40°O:

$I= U(30°S) + U(60°S) – 2U(45°S)$, donde U es la componente zonal del viento ($m.s^{-1}$) a 500 hPa (NCEP-NCAR reanalices, Kalnay *et al.*, 1996). Se calcularon los valores medios para 15, 20 y 30 días de setiembre y octubre)

e) Efecto interactivo entre variables analizadas (producto de hasta tres variables).

Análisis estadístico

- Cálculo de coeficientes de correlación (r) de Kendall entre los niveles epidémicos y los predictores meteorológicos analizados por área homogénea

- Mediante la técnica de regresión logística (De Wolf *et al*., 2002; Moschini *et al*., 2006) se estimó la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica en base a una o varias de las variables regresoras analizadas (simples o como componente interactivo). Regla de decisión: se pronostica la categoría epidémica con la máxima probabilidad asociada de ocurrencia. El procedimiento Logistic del SAS fija modelos de regresión paralelos para datos de respuesta ordinaria por medio del método de máxima verosimilitud, basado en la distribución de probabilidad acumulada de los niveles de respuesta. Una función logit (logaritmo natural de (Pr / 1- Pr), siendo Pr la probabilidad acumulada de las categorías epidémicas) establece la unión entre el componente estocástico y las variables regresoras meteorológicas (las incluidas en el modelo lineal múltiple seleccionado). Los supuestos requeridos por el análisis de regresión lineal paramétrico no se exigen en la regresión logística.
- Precisión de predicción: porcentaje de casos correctamente clasificados. Si en cada uno de los casos analizados se compara la categoría epidémica observada versus la predicha con la máxima probabilidad de ocurrencia por la ecuaciones logísticas desarrolladas, se puede calcular el porcentajes de casos correctamente clasificados.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Áreas Homogéneas en región pampeana

Mediante la técnica de agrupamiento de Lund (1963) se reconocieron en la región siete áreas homogéneas (Figura III-1) respecto a la variabilidad temporal de los valores anuales de incidencia de la FET (ecuación III-1) y ajustes para el norte y sur.

Área II: en la primera corrida, Zavalla se correlacionó con r>0,8 con nueve sitios: Rosario, San Pedro, Oliveros, Castelar, M. Juárez, Pergamino, Gualeguaychú, Laboulaye y Junín.

Área I: C. del Uruguay (segunda corrida) se correlacionó con r>0,7 con cuatro sitios: Rafaela, Santa Fé, Paraná y Concordia (Ceres se incluyó al área).

Área IV a: (tercer corrida) surgió Azul correlacionado con r>0,7 con cuatro sitios: Tandil, C. Suárez, Barrow y Bolívar (se agregó Bahía Blanca e H. Ascasubi).

Área III (cuarta corrida). La Plata se correlacionó con r>0,7 con Nueve de Julio, Las Flores y Dolores.

Área V b: (cuarta corrida) Córdoba se correlacionó con Río Cuarto con r>0,7 (se suma al área Manfredi.

Área IV b: Balcarce se correlacionó con Mar del Plata con r>0,7.

Área V a: G. Pico se agrupó con Pehuajó (r=0,62) y con Anguil (r=0,52).

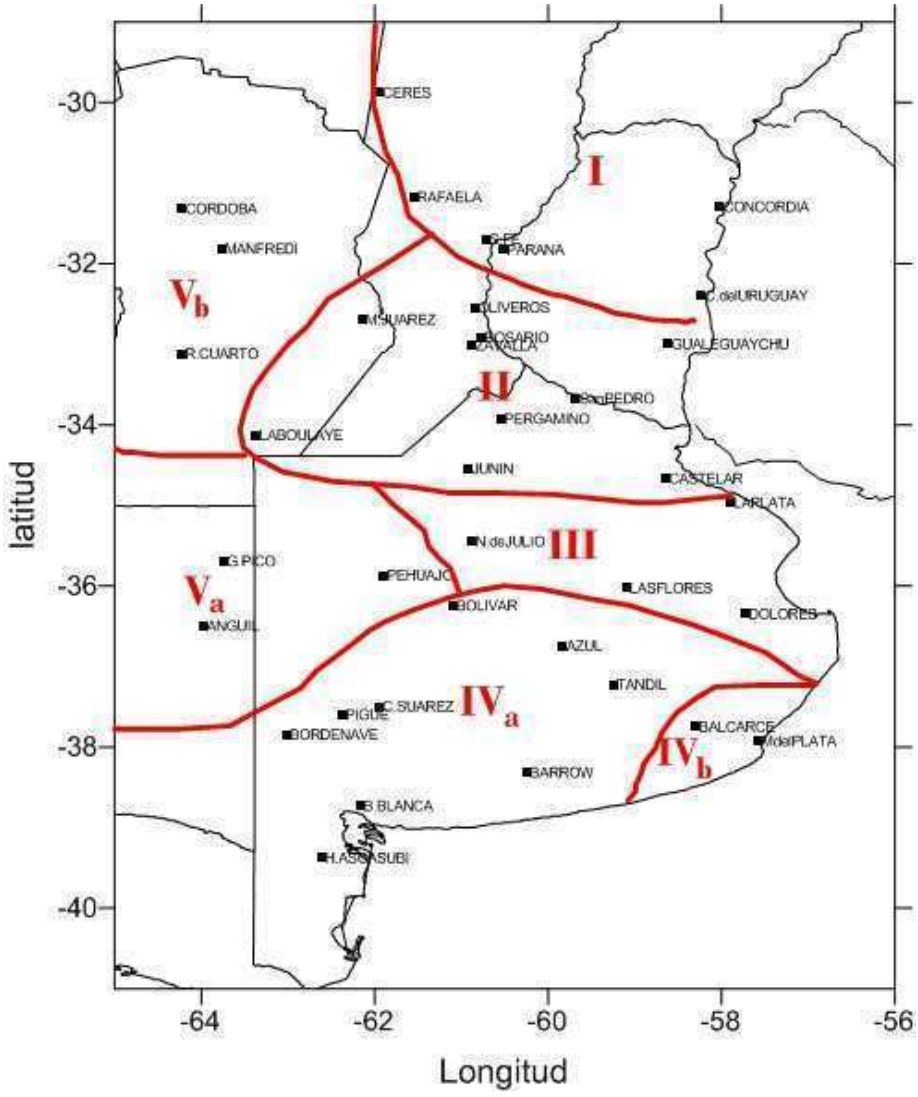

Figura III-1: Áreas Homogéneas (AH) delimitadas en relación a la variación temporal de la incidencia de la FET (1971-2006)

En la tabla III-1 se presenta por área homogénea los más altos coeficientes de correlación (r) de Kendall obtenidos entre predictores meteorológicos analizados y los niveles anuales epidémicos de la FET (categorizados como severo, moderado y ligeros a nulos). Muchos de los predictores mostrados integran, como componentes simples y/o interactivos (producto de dos hasta tres predictores simples), los modelos logísticos seleccionados por área homogénea.

Para el sector NE de la región pampeana (Tabla III-1: áreas homogéneas I y II), de máximo riesgo climático respecto a la FET, los valores del modo anular del Sur (MAS) del mes de agosto (relación directa, r_K positivo) y los índices de setiembre que señalan la dominancia de circulación meridional N-NE (relación inversa, r_K negativo), resultaron los mejores predictores analizados. El IOS sólo participa interactuando con los anteriores. Varios autores (Silvestri y Vera, 2003; Reboita *et al*., 2009) concluyen de manera general que anomalías negativas de precipitación son observadas en el sur de Sudamérica durante una fase positiva del MAS y positivas con MAS negativo en el sector norte. Sin embargo, mapas realizados para la estación primaveral por Reboita *et al*. (2009) muestran para toda la región pampeana una anomalía negativa de precipitación con MAS (-) y una anomalía positiva (coincidente con el área homogénea I y con el este de la II) a neutra con MAS (+). En el mismo sentido, Silvestri y Vera (2003) encontraron correlaciones significativas positivas (0,35-0,45) entre el índice MAS y la anomalía de precipitación del bimestre Setiembre-Octubre, en el centro-norte de la región pampeana. Estas conclusiones armonizan con el coeficiente de correlación de Kendall positivo encontrado para el predictor MAS, indicando que valores positivos del índice estarían asociados a mayores niveles de incidencia de la FET.

En el sur de la región pampeana (Tabla III-1), el índice ligado al MAS no surgió como predictor de importancia, en coincidencia con las correlaciones no significativas encontradas por Silvestri y Vera (2003) entre el MAS y la anomalía de precipitación para el bimestre Noviembre-Diciembre. En el sur de la región pampeana (áreas IVa y IVb) (Tabla 1), el IOS realiza un aporte significativo para explicar la variabilidad en los niveles de enfermedad. En ambas áreas se destacan las variables asociadas a la ocurrencia situaciones de acción bloqueante (I>0) en el sur del continente, en 100°O y 70°O (octubre). Los valores promedio de I en 100°O en octubre alcanzó el máximo coeficiente de Kendall (0,49). Coincidente con estos resultados, Grimm *et al*. (2000) muestran que durante el invierno tardío (agosto a octubre) la precipitación coincide con la mediana en el centro norte de la región pampeana en años con fase El Niño, en cambio supera a la mediana en el trimestre primaveral (octubre-diciembre) en el S-SO de la región. Moschini *et al*. (2008) analizaron en Paraná y Balcarce las anomalías anuales de incidencia (por ecuación predictiva) de la FET respecto a la media de la serie 1971-2006. En Paraná sólo 3 de 12 años El Niño superaron a la media de la enfermedad y 7 de 11 La Niña resultaron con anomalía negativa. En Balcarce la tendencia fue firme en el sentido de presentar anomalías positivas en años El Niño (9 de 12) y negativas en

La Niña (9 de 11). El efecto estimulante de una Fase El Niño sobre el patosistema se incrementó en Balcarce, donde la variable hídrica de la ecuación predictiva se procesa en la primavera tardía (noviembre), coincidiendo con la antesis del trigo.

Tabla III-1. Valores de coeficientes de correlación (r) de Kendall correspondientes a predictores meteorológicos (simples e interacciones) en relación a los niveles epidémicos anuales de la FET (severo, moderado y ligero- nulo), por área homogénea.

Predictores simples*				**Interacción**
Area Homogénea I				
MASa= 0,33		Dhgp2s= -0,28		MASa*IOSjl= -0,15
MASja= 0,23		Dhgp1s= -0,19		Dhgp1a*Dhgp2s= -0,11
		Hgp1s=0,18		Dhgp1s* MASja= -0,13
Area Homogénea II				
MASa= 0,22	IOSs= -0,28	Dhgp1s= -0,29		Dhgp2s*IOSa = -0,14
	IOSjjas= -0,25	Dhgp2s= -0,34		
Área Homogénea III				
MASjj= 0,12	IOSjj= -0,36			
	IOSjn= -0,37			
	IOSas= -0,16			
Área Homogénea Iva				
	IOSmjj= -0,33	Dhgp2s= -0,23	I10030o=0,35	
	IOSjas= -0,23			
Área Homogénea Ivb				
	IOSs= -0,29		I10030o=0,49	
	IOSas= -0,28		I7030o= 0,40	
Área Homogénea Va				
MASjaso=0,31				MASa*IOSjn*INOjn= -0,36
MASo= 0,26				
MASa= 0,26				
Área Homogénea Vb				
MASa= 0,20	IOSs= -0,37			MASa*IOSa= -0,08
	IOSa= -0,22			

* MASa; MASo: valor mensual del Modo Anular del Sur u Oscilación Antártica para el mes de Agosto y Octubre respectivamente. MASjj; MASaso; MASjaso: valores promedio del Modo Anular del Sur para Junio-Julio, Agosto-Setiembre-Octubre y Julio-Agosto-Setiembre-Octubre respectivamente. IOSjn; IOSa; IOSs: valor del Indice de Oscilación del Sur para el mes de Junio, Agosto y Setiembre respectivamente. IOSjas; IOSas; IOSmjj: valores promedio del índice de oscilación del sur para Julio-agosto-setiembre, Agosto-Setiembre y Mayo-Junio-Julio respectivamente. INOjn: valor medio del índice niño oceánico (INO) del trimestre Mayo-Junio-Julio. Dhgp1s; Dhgp1a : diferencia entre los valores mensuales de altura geopotencial a 1000 hPa de los puntos de longitud 100°O y 45°O para la latitud 40°S, para los meses de setiembre (s) y agosto (a). Hgp1s; Hgp2s: altura geopotencial a 1000 hPa en los puntos de coordenadas 40°S:45°O y 40°S:100°O de setiembre Dhgp2s; Dhgp2a; Dhgp3s; Dhgp4a; Dhgp5a: diferencia entre los valores mensuales de altura geopotencial a 1000 hPa de los puntos de longitud 100°O y 60°O para las latitudes 40°S, 37,5°S, 35°S y 32,5°S respectivamente, para los meses de setiembre (s) y agosto (a). I7030o y I10030o = media de los 30 días de octubre del índice zonal (I) calculado a 500 hPa en 70°O y 100°O mediante la siguiente ecuación: I=U30°S+U60°S - 2 U45°S

Para las áreas homogéneas analizadas, en las tablas III-2, III-3 y III-4 se detallan los modelos logísticos desarrollados para clasificar cada uno de los niveles epidémicos anuales categorizados como severo (S), moderado (M) o ligero a nulo, utilizando predictores meteorológicos simples e interacciones. Además se muestra la precisión de predicción (Prec.%).

De acuerdo a la tabla III-2, los modelos logísticos desarrollados para el área I clasificaron correctamente el 58% (modelo 1), 64% (modelo 2) y 72% (modelo 3) de los años. Las epidemias más severas observadas en la serie histórica analizada (no sólo predicha), como en las campañas trigueras 1978, 1985 y 1993, fueron correctamente clasificadas por los modelos 1 y 2, no así la del 2001 (clasificada como moderada). El modelo 3 con cinco variables meteorológicas logró clasificar correctamente las cuatro epidemias más severas. En el AH II, ninguno de los modelos pudo predecir la severa epidemia de 2001 (predicha como ligera), en cambio fueron exitosos para predecir las epifitias 1978, 1985 y 1993. El modelo 3 con cinco variables alcanzó una precisión de predicción del 83 %.

En tabla III-3, el modelo 1 del AH IVb clasificó correctamente las epidemias de 1976, 1977, 1985 y 2001, que afectaron fuertemente a los trigos fideos sembrados en el SE bonaerense.

Tabla III-2. Modelos logísticos ajustados en las áreas homogéneas (AH) I y II para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica: severa (S), moderada (M) o ligera a nula (L), en base a predictores meteorológicos simples e interacciones. Se presenta por modelo la precisión de predicción (PrecP%)

	Ecuaciones de cada Modelo*	**PrecP %**
Area Homogénea I		
1	LogitPrS= – 7,99 + 0,65 MASa + 0,042 hgp1s– 0,0665 It1 LogitPrMac= – 5,78 + 0,65 MASa + 0,042 hgp1s– 0,0665 It1	58
2	LogitPrS= – 9,44 + 0,76 MASa + 0,09 hgp1s– 0,07 It1 – 0,0005 It2 LogitPrMac= – 7,07 + 0,76 MASa + 0,05 hgp1s– 0,07 It1 – 0,0005 It2	64
3	LogitPrS= –14,79+0,76 MASa + 0,09 hgp2s – Dhgp2s– 0,0008 It2 – 0,0149 It3 LogitPrMac= – 14,79+0,76 MASa + 0,09 hgp2s – Dhgp2s– 0,0008 It2 – 0,0149 It3	72
Area Homogénea II		
1	LogitPrS =-1,763 + 0,58 MASa – 0,06 Dhgp2s – 0,0035 It4 LogitPrMac= 0,046 + 0,58 MASa – 0,06 Dhgp2s – 0,0035 It4	72
2	LogitPrS=-1,919 + 0,81 MASa – 0,08 Dhgp2s – 0,09 I7015s – 0,006 It4 LogitPrMac= 0,064 + 0,81 MASa – 0,08 Dhgp2s – 0,09 I7015s – 0,006 It4	78
3	LogitPrS=-2,04+0,75 MASa – 0,08 Dhgp2s – 0,11 I7015s –0,006 It3+0,0013 It5 LogitPrMac=-0,0024+0,75 MASa–0,08 Dhgp2s–0,11 I7015s –0,006 It3+0,0013 It5	83

*LogitPrS=ln(PrS/1-PrS); LogitPrMac=ln(PrMac/1–PrMac). Resolviendo las expresiones Exp(LogitPrS)/ (1+Exp(LogitPrS)) y Exp(LogitPrMac)/ (1+Exp(LogitPrMac)) se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel epidémico severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurencia de un nivel epidémico => al moderado (M)). Ln es el logaritmo natural. PrM=PrMac-PrS. PrL=1-(PrS+PrM) siendo PrL la probabilidad de observar un nivel epidémico ligero a nulo (L).

It1=MASa*IOSjl; **It2**=Dhgp1a* Dhgp2s; **It3**=Dhgp1s* MASja; **It4**=Dhgp2s*IOSa; **It5**=Dhgp2s *I7010s

Dhgp1s; Dhgp1a : diferencia entre los valores mensuales de altura geopotencial a 1000 hPa de los puntos de longitud 100°W y 45°W para la latitud 40°S, para setiembre (s) y agosto (a) respectivamente.

Dhgp2s : diferencia entre los valores mensuales de altura geopotencial a 1000 hPa de los puntos de longitud 100°W y 60°W para la latitud 40°S, para setiembre (s).

Hgp1s; Hgp2s: altura geopotencial a 1000 hPa en los puntos de coordenadas 40°S;45°O y 40°S;100°O de setiembre.

I7015s: media de los primeros 15 días de setiembre del índice de bloqueo (I) calculado mediante el viento zonal a 500 hPa en 70°O (I=U30°S+U60°S-2 U45°S)

I7030o y I10030o = media de los 30 días de octubre del índice de bloqueo (I) calculado mediante el viento zonal a 500 hPa en 70°O y 100°O respectivamente(I=U30°S+U60°S-2 U45°S).
MASa: valor mensual del Modo Anular del Sur u Oscilación Antártica para el mes de Agosto.
IOSjl; **IOSa**: valor del Indice de Oscilación del Sur para el mes de Julio y Agosto respectivamente

Tabla III-3. Modelos logísticos ajustados en las áreas homogéneas III, IVa y IVb para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica: severa (S), moderada (M) o ligera a nula (L), en base a predictores meteorológicos simples e interacciones. Se presenta por modelo la precisión de predicción (PrecP%)

	Ecuaciones de cada Modelo*	**PrecP** %
Area Homogénea III		
1	LogitPrS= -5,22 - 0,45 IOSmjj + 0,27 IOSas + 0,49 MASjj LogitPrMac= -5,22 - 0,45 IOSmjj + 0,27 IOSas + 0,49 MASjj	83
Area Homogénea IVa		
1	LogitPrS = -4,12 - 0,54 IOSmjj + 0,44 IOSjas + 0,155 I10030o LogitPrMac= -2,31 - 0,54 IOSmjj + 0,44 IOSjas + 0,155 I10030o	89
Area Homogénea IVb		
1	LogitPrS = -1,96 + 0,15 I7030o + 0,18 I10030o + 0,015 It6 LogitPrMac= 0,29 + 0,15 I7030o + 0,18 I10030o + 0,015 It6	83

* LogitPrS=ln(PrS/1-PrS); LogitPrMac=ln(PrMac/1–PrMac). Resolviendo las expresiones Exp(LogitPrS)/ (1+Exp(LogitPrS)) y Exp(LogitPrMac)/ (1+Exp(LogitPrMac)) se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel epidémico severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel epidémico => al moderado (M)). Ln es el logaritmo natural. PrM=PrMac-PrS. PrL=1-(PrS+PrM) siendo PrL la probabilidad de observar un nivel epidémico ligero a nulo (L).
MASjj : valor promedio del Modo Anular del Sur para Junio-Julio. **IOSjas; IOSas; IOSmjj**: valores promedio del índice de oscilación del sur para Julio-agosto-setiembre, Agosto-Setiembre y Mayo-Junio-Julio respectivamente.**I7030o**= media de los 30 días de octubre del índice de bloqueo (I) calculado mediante el viento zonal a 500 hPa en 70°O (I=U30°S+U60°S-2 U45°S). **I10030o**= media de los 30 días de octubre del índice de bloqueo (I) calculado mediante el viento zonal a 500 hPa en 100°O (I=U30°S+U60°S-2 U45°S). **It6**= IOSas*I10030o

En las áreas de la región pampeana con menor riesgo climático (Oeste y SO) respecto a la FET (Va y Vb), se destaca el predictor MAS del mes de agosto en el sector

norte (área Vb), en coincidencia con lo encontrado en las áreas homogéneas I y II. Como el área III, el sector Va muestra un modelo de transición, con predictores asociados al MAS (ajustados al norte) y otros relacionados al índice de Oscilación del Sur (ajustados en las áreas del sur de la región pampeana) (Tabla III-4).

Tabla III-4. Modelos logísticos ajustados en las áreas homogéneas Va y Vb para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica: severa (S), moderada (M) o ligera a nula (L), en base a predictores meteorológicos simples e interacciones. Se presenta por modelo la precisión de predicción (PrecP%)

	Ecuaciones de cada Modelo*	**PrecP %**
Area Homogénea Va		
1	LogitPrS=-5,33 + 0,85 MASo + 0,31 MASjaso – 0,15 it7 LogitPrMac= -1,19 + 0,85 MASo + 0,31 MASjaso – 0,15 it7	78
Area Homogénea Vb		
1	LogitPrS=-2,67 - 0,35 MASa + 0,17 IOSa - 0,23 IOSs – 0,04 it8 LogitPrMac= -0,70 – 0,35 MASa + 0,17 IOSa - 0,23 IOSs – 0,04 it8	64

* LogitPrS=ln(PrS/1-PrS); LogitPrMac=ln(PrMac/1–PrMac). Resolviendo las expresiones Exp(LogitPrS)/ (1+Exp(LogitPrS)) y Exp(LogitPrMac)/ (1+Exp(LogitPrMac)) se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel epidémico severo (S)) y PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel epidémico => al moderado (M)). Ln es el logaritmo natural. PrM=PrMac-PrS. PrL=1-(PrS+PrM) siendo PrL la probabilidad de observar un nivel epidémico ligero a nulo (L).

MASa y MASo: valor mensual del Modo Anular del Sur u Oscilación Antártica para el mes de Agosto y Octubre respectivamente. **MASjaso**: valores promedio del Modo Anular del Sur para Julio-Agosto-Setiembre-Octubre**. IOSjn**; **IOSa; IOSs**: valor del Indice de Oscilación del Sur para el mes de Junio, Agosto y Setiembre respectivamente. I**NOjn**: valor medio del índice Niño Océanico (NOAA) del trimestre Mayo-Junio-Julio. **It7**= MASa*IOSjn*INOjn**; It8**= MASa*IOSa

4 CONCLUSIONES

Las condiciones atmosféricas presentan fluctuaciones irregulares en un amplio rango de escalas temporales, desde semanales a mayores escalas causantes de variabilidad intra-estacional (26-60 días), inter-anual e inter-decadal (Garreaud *et al.*, 2008). En este trabajo, niveles de expresión de epidemias de la fusariosis de la espiga de

trigo (FET) se pudieron asociar a la variabilidad climática generada por fenómenos de crecientes escalas espacio-temporales, como ENOS, MAS, índices que describen la circulación meridional dominante (N-NE o S-SO) y al índice zonal relacionado a la ocurrencia de situaciones de acción bloqueante en el sur de Sudamérica.

Los modelos logísticos desarrollados en el centro-noreste de la región pampeana incluyeron predictores relacionados con el MAS en agosto y al índice que describe la circulación meridional dominante en setiembre. Mayores niveles de incidencia de la FET estarían asociados a una fase positiva del MAS (relación directa) y a una circulación meridional dominante del N-NE (relación inversa), en agosto y setiembre respectivamente.

En el sur de la región pampeana (áreas IVa y IVb) mayores niveles de enfermedad se esperan con valores negativos del IOS (fase El Niño) en meses previos al período crítico para la infección y a la ocurrencia de situaciones de acción bloqueante (I>0) en el sur sudamericano en octubre.

La identificación y cuantificación del efecto de los predictores meteorológicos analizados podría sustentar la elaboración de pronósticos estacionales de niveles esperables de expresión de la FET, con antelación al período susceptible del cultivo y/o toma de decisión de control químico. La disponibilidad de dichos pronósticos podría aportar elementos útiles al manejo racional estratégico y táctico del patosistema.

CONSIDERACIONES FINALES

En Argentina, el agente causal de la fusariosis de la espiga de trigo (FET) es el hongo *Fusarium graminearum* (Schwabe) anamorfo de *Gibberella zeae* (Schw.) Petch. El CIMMyT ha identificado a la FET como el principal factor limitante de la producción de trigo en muchas regiones del mundo. La complejidad de la FET y su amenaza multifacética al afectar al rendimiento y calidad de la producción granaria como a la salud humana y animal por acción de micotoxinas asociadas, imponen el uso de múltiples e integradas estrategias de manejo de la enfermedad. La naturaleza esporádica de la FET, relacionada fuertemente al factor ambiental, estimularon el desarrollo de sistemas empíricos (Pergamino) y fundamental-empírico (Pergamino-M. Juárez) para estimar la incidencia de la FET e índice de Fusarium (Incidencia x Severidad) respectivamente, con sus correspondientes trabajos de validación y ajuste para su uso en sitios diferentes a los de desarrollo, en la región pampeana. Ambos sistemas de pronóstico de la FET identifican eventos infectivos por mojado de la espiga combinando la ocurrencia de precipitación y altos registros de humedad relativa. Sus predicciones retrospectivas de intensidad de la enfermedad en sitios de la región pampeana, a partir de elementos meteorológicos simples de paso diario, permitieron abordar estudios para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos de creciente escala espacio-temporal relacionados al patosistema. En Paraná y Pergamino se identificaron tipos sinópticos (A-sev) ligados a infecciones severas de la FET, cuyos campos medios resultaron de promediar 33 y 31 secuencias de mapas de 3 días (correlacionadas con r>=0,7; método de Lund) de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de cada evento infectivo y de los dos previos. La fuerte actividad del anticiclón Atlántico permitió el ingreso de aire húmedo y cálido del N-NE sobre el centro-norte argentino, dominado por actividad ciclónica (alrededor de 75 hPa de altura geopotencial en el área de Paraná-Pergamino). Esta situación sinóptica no fue removida rápidamente en los días posteriores al inicio del evento infectivo, justificando la dominante ocurrencia de lapsos de mojado de la espiga de trigo de larga duración, asociada a niveles severos de infección. La situación sinóptica más frecuente expresada en el tipo sinóptico A-lig ligado a infecciones ligeras de la FET mostró un anticiclón Atlántico más debilitado y una actividad ciclónica en el centro norte del país que fue rápidamente desplazada en los días posteriores al inicio del evento infectivo. Para

Balcarce, los ataques severos de la FET coincidieron con un desarrollo ciclónico en el sur bonaerense, confirmado por la presencia de una fuerte anomalía negativa de altura geopotencial (1000 hPa) cubriendo la provincia de Buenos Aires. Para los tipos sinópticos A-sev y A-lig prevalecieron vientos de dirección NE al inicio de los eventos infectivos.

También en la escala sinóptica se estudió la influencia de situaciones de acción bloqueante en el sur de Sudamérica sobre la ocurrencia de eventos infectivos de la FET (estimados por el sistema fundamental-empírico). Para ello se calculó un índice (I) que utiliza la componente zonal del viento en el nivel de 500 hPa. El porcentaje medio de días coincidentes con eventos infectivos de la FET con I>0 (vientos del oeste debilitados en 45° S) más elevado (69,7 %) fue alcanzado por el índice zonal calculado en la longitud 70°O. Se verificó una tendencia al incremento de la frecuencia de días con valores I>0, acompañando a la ocurrencia de eventos infectivos de la FET de más larga duración (>=30 h), especialmente en el sur. También en Balcarce se observó una más frecuente ocurrencia de períodos de 5 o más días consecutivos con I>0, en coincidencia con los ciclos epidémicos anuales más severos. Para las epidemias de la FET más severas según registros históricos y confirmadas por los modelos predictivos, se observó un neto predominio de valores de I (70°O) positivos asociados a los días con ocurrencia eventos infectivos de la FET en el período susceptible del trigo (desde 55% al 100% de los días). Finalmente se analizó el mapa de anomalía media de altura geopotencial para 1000 hPa del día inicial de los 31 eventos infectivos severos agrupados en el tipo A-sev en Pergamino, encontrándose una configuración (baja presión ocupando el NE de Argentina y alta presión en el Atlántico sur) que llevó a la dominancia de una circulación de dirección NE en Patagonia.

Mediante el ajuste de modelos logísticos, se buscó cuantificar el efecto de numerosos índices correspondientes a fenómenos de escala hemisférica sobre la probabilidad de ocurrencia de niveles de incidencia de la FET (sistema empírico de pronóstico) en áreas homogéneas (respecto a la variación temporal de la enfermedad) de la región pampeana. Los predictores meteorológicos fueron procesados en lapsos que anteceden al período crítico para la infección en el trigo (espigas con anteras expuestas) y/o control químico de la FET. En el NE y centro-Este de la región pampeana, mayores niveles de enfermedad se esperarían con valores más altos del índice MAS (Modo Anular del Hemisferio Sur u Oscilación Antártica) en agosto y con dominancia de circulación meridional N-NE en setiembre. El mejor modelo logístico (5 variables)

desarrollado para el NE clasificó correctamente el 72 % de los años, incluyendo las más severas epidemias de 1978, 1985, 1993 y 2001. En la centro-Este, el mejor modelo con cinco variables alcanzó una precisión de predicción de 83 %. En el sur de la región pampeana (áreas continental y costera), el IOS (índice de Oscilación del Sur) realizó un aporte significativo para explicar la variabilidad en los niveles de enfermedad, destacándose también las variables asociadas a la ocurrencia de situaciones de acción bloqueante y/o debilitamiento de los vientos patagónicos del oeste (I>0) en el sur del continente, en 100°O (máxima correlación de Kendall: 0,49) y 70°O (octubre). El mejor modelo para el área costera clasificó correctamente las epifitias de 1976, 1977, 1985 y 2001, que afectaron a los trigos fideos del SE bonaerense.

Las prácticas de control de la FET incluyen el uso de fungicidas cuyas aplicaciones pueden realizarse como máximo 2-3 días posteriores al evento infectivo (semi-preventiva). El uso combinado de sistemas de pronóstico de la FET y de pronósticos meteorológicos específicos puede ayudar a establecer en tiempo real y/o anticipar la ocurrencia de eventos infectivos severos. Los estudios en la escala sinóptica se han conducido con la idea de aportar nuevos elementos a la toma de decisión respecto al control químico. Asimismo, se identificó y cuantificó el efecto de múltiples predictores meteorológicos de escala hemisférica sobre la variabilidad espacio-temporal epidémica. Estos resultados podrán ser útiles para la elaboración de pronósticos estacionales de la intensidad esperada de la FET, con antelación al período susceptible del cultivo y/o momento de posible control químico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alessandro, A.P. 2003 (a). Blocking action situations in the south of South America during the 1990s. Meteorológica Vol 28 N° 1 y 2: 23-37

Alessandro, A.P. 2003 (b) The influence of blocking events on temperature and precipitation in Argentina during the 1990s. Meteorológica Vol 28 N° 1 y 2: 39-52

Alessandro, A.P. 2008 Temperature and precipitation conditions in Argentina associated with strong westerly mid-latitute. Revista Brasileira de Meteorología, v.23, n.2: 126-142

Andersen, A.L. 1948. The development of *Gibberella* zeae head blight of wheat. *Phytopathology* 38:599-611.

Annone, J.G. y E. Frutos. 1988. Estimación del efecto del 'golpe blanco' del trigo *(Fusarium graminearurn*) sobre la producción de granos de un grupo de variedades comerciales. Informe técnico 218. E.E.A. INTA Pergamino. Argentina.

Annone, J.G. ; H. Conta; A. Calzolari; O. Polidoro. 1995. Comportamiento sanitario de cultivares de trigo en Pergamino. Campaña 1995/96. Información N°173. Marzo 1996. EEA INTA Pergamino. pp 7

Annone, J.G. 2003. Particularidades del control químico de la FET. Seminario: problemas asociados a la Fusariosis en trigo y estrategias para su prevención. Bolsa de Cereales de Buenos Aires 3-4 de julio de 2003.

Bai, G.H. and G. Shaner. 1994. Scab of Wheat: Prospects for control. Plant Disease, 78 (8):760-766.

Baker, K.M. and W.W. Kirk. 2007. Comparative analysis of models integrating synoptic forecast data into ptato late blight risk estimate systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 57: 23-32.

Bischoff, S.; A. Berman. 2005. Sudestadas en el Río de la Plata asociadas a precipitación en la ciudad de Buenos Aires. Congremet IX 3 al 7 de octubre de 2005. Buenos Aires Argentina.

Bjerknes, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev*. 97: 163-72.

Bourke, P.M.A. 1970. Use of weather information in the prediction of plant disease epiphytotics. In Plant disease prediction from weather data. 345-370.

Camilioni, I; V. Barros; G.Escobar; A. Di Luca. 2005. Tendencias en la posición del Anticiclón del Atlántico Sur y su representación por modelos climáticos globales: impactos sobre el estuario del Río de la Plata y océano adyacente. Congremet IX 3 al 7 de octubre de 2005. Buenos Aires Argentina.

Carranza, M.R.; G.A. Lori; M.N. Sisterna. 2002. Fusaria involved in the head blight complex of wheat in Argentina. Fitopatología **37**: 164-168

Carranza, M.R; R.C. Moschini; G. Kraan and J.H. Bariffi. 2007. Examination of meteorology-based predictions of Fusarium head blight of wheat grown at two locations in the southern Pampas region of Argentina. *Australasian Plant Pathology* 36: 1-4.

Cheng, C.S.; H. Auld; G.Li; J. Klaassen; B.Tugwood; Q.Li. 2004. An automated synoptic typing procedure to predict freezing rain: an application to Ottawa, Ontario, Canada. *Weather and Forecasting*, 19: 751-768.

Compagnucci, R.H.; D. Araneo; O.O.Canziani. 2001. Principal sequence pattern analysis: a new approach to classifying the evolution of atmospheric systems. *Int. J. Climatol*.21: 197-217.

Davis, R.T. and G.A. Snow. 1968. Weather systems related to fusiform rust infection. *Plan Disease Reptr* 52: 419-422.

Del Ponte, E.M.; J.M.C. Fernandes; C.R. Pierobom; G.C. Bergstrom. 2004 Giberela do trigo. Aspectos epidemiológicos e modelos de previsao. *Fitopatologia Brasileira* 29: 587-605.

Del Ponte, E.M.; J.M.C. Fernandes; W.A. Pavan. 2005 A risk infection simulation model for Fusarium Head Blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira* 30: 634-642.

Del Ponte, E.M.; J.M.C. Fernandes; W.A. Pavan; W.E. Baethgen. 2009. A model-based assessment of the impacts of climate variability on Fusarium Head Blight seasonal risk in southern Brazil. *J Phytopathol*. 157:675-681.

De Souza, J.; N. Formento. 2004. Estudios de antesis en trigo y su relación con la Fusariosis (*Fusarium graminearum y Fusarium spp*.) Actas VI Congreso Nacional de Trigo. Bahía Blanca 20-22 octubre 2004

Detrixhe, P.; A. Chandelier; M. Cavelier; D. Buffet; R. Oger. 2003. Development of an agrometeorological model integrating leaf wetness duration estimation to assess the risk of head blight infection in wheat. *Aspects of Applied Biology* 68, 2003. Mycotoxins in food production systems.

Del Ponte, E. M.; Fernandes J.M.C.; Pavan W.; Baethgen. 2009. A model-based assessment of the impacts of climate variability on Fusarium Head Blight seasonal risk in southern Brazil. J Phytopathol 157: 675-681.

De Wolf, E.D.; L.V. Madden and P.E. Lipps. 2002. Risk assessment models for wheat fusarium head blight epidemics based in within-season weather data. Phytopathology 93:428-435.

De Wolf, E.D.; A.I. Scott. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. Annu. Rev. Phytopathol. 45:203-220.

Escobar, G.C.J. and S.A. Bischoff. 1999. Meteorological situations associated with significant temperature falls in Buenos Aires: an application to the daily consumption of residential natural gas. *Meteorol. Appl*. 6: 253-260.

Escobar, G.C.J.; R.H. Compagnucci and S.A. Bischoff. 2003. Synoptic system tracks associated to cold air incursions over Buenos Aires. American Meteorology Society Sixth Southern Hemisphere

Farías, F.; A. Montecinos; P. Aceituno. 2003. Seasonal forecast of rainfal in central Chile using the "Logistic" method. American Meteorology Society Sixth Southern Hemisphere.

Fernández, M.R. and J.M.C. Fernandes. 1990 Survival of wheat pathogens in wheat and soybean residues under conservation tillage systems in southern and central Brazil. Canadian Journal of Plant Pathology 12:289-294.

Flamenco, E.; C. Rebella; S. Carballo; R. Rodriguez. 2002. Metodología de pronóstico estacional de lluvias en regiones de la Argentina. Rev. Arg. de AGROMETEOROLOGÍA, 2 (2): 134-141.

Francl, L.; G. Shaner; G. Bergstrom; J. Gilbert; W. Pedersen; R. Dill-Macky; L. Sweets; B. Corwin; Y. Jin; D. Gallenberg and J. Wiersma. 1999. Daily inoculum levels of *Gibberella zeae* on wheat spikes. Plant Dis. 83:622-666.

Franz, E.; K. Booij; I. Van der Fels-Klerx. 2009. Prediction of Deoxynivalenol content in Dutch winter wheat. *Journal of Food Protection* Vol 72, n° 10: 2170-2177.

Galich, M.T.V. de ; A.N. Galich. 1994. Enfermedades del trigo en el área sur de Santa Fé y Córdoba. EEA Marcos Juárez. INTA Información para extensión N° **5**. pp. 1-7.

Galich, A.N.; M.T.V. de Galich. 1996. Enfermedades del trigo en el área central norte de la región cerealera argentina. EEA INTA Marcos Juarez. Informe Técnico N° **121**.pp 1-25.

Galich, M.T.V. de. 2004. Fusariosis de la espiga del trigo. Desarrollo de cultivares resistentes. IDIA XXI . INTA Año IV, 6: 50-57

Garreaud, R.D. ; M. Vuille; R. Compagnucci; J.9 Marengo. 2008. Present-day South American climate. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. (2008) doi: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

Gillett, N.P.; T.D. Kell; P.D.Jones. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. Geophys. Res Lett., 33, I23704, 2006

González Montaner, J. 2004. Avances en el control de enfermedades en trigo. A Todo Trigo, un Congreso para todos. Mar del Plata, 13-14/05/2004. p 43-54

Goswami, R.S.; H.C. Kistler. 2004. Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. Mol. Plant Pathol. 5:515-525

Graham S.; R.A. Browne. 2009. Anther extrusion and Fusarium Head Blight resistance in european wheat. *J Phytopathol* 157:580-582.

Grimm, A.M.; V.R. Barros; M.E. Doyle. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *J. Clim*., 13: 35-58

Hyre, R.A. and J.G. Horsfall. 1951. Forecasting potato late blight in Connecticut. Plant Dis. Rep. 35:423-431

Kalnay, E. and Co-authors, 1996 The NCEP/NCAR 40 year Reanalysis Proyect. Bull.Amer. Meteor. Soc., 77 (3), 437-471.

Kikot, G.; R.C. Moschini; V.F. Consolo; R. Rojo; G. Salerno; R.A. Hours; L. Gasoni; A.M. Arambarri and T.M. Alconada. 2010. Occurrence of different species of *Fusarium graminearum* from wheat in relation to disease levels predicted by weather-based models in Argentina Pampas Region. *Mycopathologia* DOI 10.1007/s11046-010-9335-0. Publicado on line 27 de junio 2010

Krause, R. A. and L.B. Massie. 1975. Predictive systems: Modern approaches to disease control. Annu. Rev. Phytopathol. 13: 31-47.

Labraga, J.C; B. Scian; O. Frumento. 2003 Atmospheric processes associated with dry and wet events in the argentinean pampas. American Meteorology Society Sixth Southern Hemisphere

Lori, G.A.; M.N. Sisterna; S.J. Sarandón; I. Rizzo; H. Chidichimo. 2009. Fusarium head blight in wheat: impact of tillage and other agronomic practices under natural infection. Crop Protection 28: 495-502

Lund, I.A. 1963. Map pattern classification by statistical methods. Journal of Applied Meteorology 2: 56-65.

Magrin, G.O.; M.I. Travasso; M.O. Grondona; G.R. Rodriguez. 1996. Assessing the impact of Climatic Variability on Maize and Wheat yields in the Argentinean Pampas Region. Abstracts of poster Sessions, second International Crop Science Congress. pp 99. New Dehli. India.

Markell, S.; L. Francl. 2003. *Fusarium* head blight inoculum: species prevalence and *Gibberella zeae* spore type. Plant Dis. 87:814-820

Marshall, G. J. 2003 Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. Journal of Climate, v. 16: 4134-4143

Martínez, M.I. 2009. Efecto del ambiente sobre la intensidad de la Fusarosis de la espiga de trigo y el contenido de Deoxinivalenol en grano. Tesis Magister de la Universidad de Buenos Aires, área: Producción Vegetal.

McMullen, M.; R. Jones; D. Gallemberg. 1997. Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact. *Plant Dis*. 81: 1340-1348.

Meinke, H. and M. Ryley. 1997. Effects of sorghum ergot on grain sorghum production: a preliminary climatic analysis. Aust. J. Agr. Res.48

Moschini, R.C. and C. Fortugno. 1996. Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *European Journal of Plant Pathology* 102: 211-218.

Moschini, R. C. 1997. Fusariosis en trigo. Manejo racional de la enfermedad mediante la utilización de modelos predictivos basados en variables meteorológicas. Revista Agromercado, cuadernillo de Trigo. Año II, N° X, Mayo 1997.

Moschini, R.C.; G. Casagrande; G. Vergara y H.A. Conti. 1997. Efectos del ENSO sobre las probabilidades de períodos secos derivadas de modelos markovianos de primer orden, en La Pampa. *Rev. Facultad de Agronomía*, 17(1): 71-76.

Moschini, R.C.; M. Carmona 1998. Fusariosis en trigo. Nuevo enfoque para su control para el área de Balcarce. Revista ALEA Informa. Año 1 Nº 8 Octubre de 1998 p 16-20.

Moschini, R.C.; M. Carmona; M.O. Grondona. 1999. Wheat head blight incidence variations in the argentinian pampeana region associated with the El Niño/Southern Oscillation. Actas Simposio en Israel Julio 1999.

Moschini, R.C.; R. Pioli; M. Carmona and O. Sacchi. 2001. Empirical predictions of wheat head blight in the northern Argentinean Pampas region. *Crop Sci.:* 41: 1541-1545 .

Moschini, R.C.; M.T.V. de Galich; J.G. Annone; O. Polidoro. 2002. Enfoque Fundamental-Empírico para estimar la evolución del Indice de *Fusarium* en trigo. Revista RIA, 31(3): 39-53

Moschini, R.C. 2004. Avances en el conocimiento del efecto ambiental sobre enfermedades de trigo en la región pampeana. A Todo Trigo, un Congreso para todos. Mar del Plata, 13-14/05/2004. p 215-223

Moschini, R.C; M.R. Carranza; M. Carmona. 2004. Meteorological-based predictions of wheat head blight epidemic in the southern argentinean pampas region. *Cereal Research Communications*. 32: 45-52.

Moschini, R.C. 2006. Modelos con base meteorológica para el manejo y control de agentes bióticos adversos de cultivos. Volumen II, pag 101-118. En Ciclo de Conferencias INTA Expone 2004/ compilador-editor: Daniel R Larrea. Buenos Aires: Ediciones INTA

Moschini, R.C.; M.N. Sisterna; M. Carmona. 2006. Modelling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas Region. *Australian Journal of Agricultural Research* 57 (11) 1151-1156.

Moschini, R.C. and S. Bischoff. 2007. Meteorological-based systems for predicting and managing Fusarium head blight epidemics in the wheat growing area of Argentina. Proceeding 5 th Canadian Workshop on Fusarium Head Blight. Winnipeg Canadá.

Moschini, R.C; S. Bischoff; M.I. Martínez. 2008 (b). Variabilidad climática y enfermedades. Caso de estudio: Fusariosis de la espiga de trigo. Pag.10-15. Horizonte A. Año 5 -N°21 Setiembre 2008. Ftad de Agronomía. AAPRESID

Moschini, R.C.; J. Castellarín; M. González; F. Ferraguti; M.I. Martínez. 2008 (a) Validación de los valores estimados de la Fusariosis de la espiga de trigo por sistemas de pronóstico basados en variables meteorológicas, en Oliveros (campaña 2007/08)

Oerke, E.C. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science, 144: 31-43.

Panisson, E.; L.L. Hoffmann; F. Fett; E.M. Reis. 2000. Ocorrrencia de Fusarium graminearum en sementes de soja Anais, XXVIII Reuniao de pesquisa de soja de regiao sul, Santa Maria CD

Panisson, E.; E.M. Reis; W. Boller. 2002. Quantificacao de propágulos de Gibberella zeae no ar e infeccao de anteras em trigo. *Fitopatologia brasileira* 27:484-488

Pisciottano, G; A. Díaz; G. Cazes; C.R. Mechoso. 1994. El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay. Journal of Climate, Vol 7, 1286-1302.

Prandini, A.; S. Sigolo; L. Filippi; P. Battilani; G. Piva 2008. Review of predictive models for Fusarium head blight and related mytoxin contamination in wheat. Food Chem. Toxicol. (2008), doi: 10.1016/j.fct.2008.06.010

Raposo, R.; D.S. Wilks and W.E. Fry. 1993. Evaluation of potato late blight forecasts modified to include weather forecasts: A simulation analysis. *Phytopathology* 83: 103-108.

Reason, C.J.C.; M. Rouault. 2005. Links between the Antarctic Oscillation and winter rainfall over western South Africa *Geophysical research letters*, Vol 32, L07705, doi:10.1029/2005GL022419.

Reboita, M.S.; T. Ambrizzi; R.P. Da Rocha. 2009 Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems Revista Brasileira de Meteorología, v.24, n.1, 48-55, 2009

Reis, E.M. 1988. Quantificacao de propágulos de *Gibberella zeae* no ar a través de armadilhas de esporos. Fitopatologia Brasileira 13:324-327.

Reis, E.M. 1989. Fusariosis: biología y epidemiología de *Gibberella zeae* en trigo. In: Kholi M. (ed.). Taller sobre Fusariosis de la espiga en América del Sur. CIMMyT, DF, p. 97-102.

Reis, E. M.; M. Carmona. 2002. Fusariosis del trigo. Biología, epidemiología y estrategias para su manejo. 25 pp.

Rossi V., Giousue S., Pattori E., Spanna F., Del Vechio A. 2003. A model estimating the risk of Fusarium head blight on wheat. EPPO Bulletin 33:421-425

Royer, M.H.; J.M. Russo; J.G.W. Kelley. 1989. Plant disease prediction using a mesoscale weather forecasting technique. *Plant Disease* 73:618-624.

Rusticucci, M. and W. Vargas. 1995. Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina. *Meteorol. Appl*., 2: 291-300.

Saharan, M.S.; J. Kumar; A.K. Sharma; S. Nagarajan. 2004. Fusarium head blight or head scab of wheat-A review. Proc. *Indian Natl. Sci. Acad.* B70 N°3 pp 255-268.

SAS Institutes Inc. 1988. SAS/Stat User's Guide. Release 6.03 Edition. Cary.

Scarpa, M.J. and L.C. Raniere. 1964. The use of consecutive hourly dew-points in forecasting downy mildew of lima bean. Plant Disease Reprt. 48: 77-81.

Scherm, H. and X.B. Yang. 1995. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/Southern Oscillation. Phytopathology 85: 970-976.

Scherm, H. and X.B. Yang. 1998. Atmospheric teleconnection patterns associated with wheat stripe rust disease in North China. Int. J. Biometeorol, 42: 28-33.

Shaafsma, A.W.; L. Tamburic-Ilinic; J.D. Miller; D.C. Hooker. 2001. Agronomic consideration for reducing DON in wheat grain. *Can.J. Plant Pathol*. 23: 279-285.

Silvestri, G. E. and C.S. Vera. 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America, Geophys. Res. Lett., 30(21), 2115, doi:10.1029/2003GL018277.

Strange, R.N. and H. Smith. 1971. A fungal growth stimulant in anthers which predisposes wheat to attack by Fusarium graminearum. *Physiol. Plant Pathol* 1: 141-150.

Strange, R.N.; J.R. Majer and H. Smith. 1974. The isolation and identification of choline and betaine as the two major components in anthers and wheat germ that stimulate Fusarium graminearum in vitro. *Physiol. Plant Pathol*. 4: 277-290.

Strange, R.N. and P.R.Scott. 2005. Plant disease: a threat to global food security. *Annu. Rev.Phytopathol.* 43: 83–116

Tanco, R; G.J. Berri. 1996. Acerca del efecto del fenómeno El Niño sobre la precipitación en la Pampa Húmeda Argentina. Actas del VII Congreso Argentino y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Bs. As., Argentina.

Vincelli P.C. and J.W. Lorbeer. 1988. Relationship of precipitation probability to infection potential of *Botrytis squamosa* on onion. Phytopathology 78: 1078-1082.

Vila, D. A. y M.O. Grondona. 1996. Estudio preliminar sobre las relaciones entre el ENSO y la frecuencia de días con lluvia en la Pampa Húmeda. Actas del VII Congreso

Argentino y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.

Walker, G.T. and E.W. Bliss.1932. World weather V. Mem Royal Meteorolog Soc.4: 53-84.

Wallin, J.R. and J.A. Riley. 1960. Weather map analysis –an aid in forecasting potato late blight. Plant Disease Reptr. 44: 227-234.

Wallin, J.R., 1962. Summary of recent progress in predicting late blight epidemics in the United States and Canada. Am. Potato J. 39: 306-312

Wright, G. and B. Hansen. 1997. Climatic effects on aflatoxin incidence and management in Peanut. 2nd Australian Peanut Conference. Handbook and Proceedings. July 1997.

Xu, X.-M. 2003. Effects of environmental conditions on the development of Fusarium ear blight *European Journal of Plant Pathology* 109: 683-689.

Xu, X.-M.; P. Nicholson; M.A. Thomsett; D. Simpson; B.M. Cooke ; F.M. Doohan; J. Brennan; S. Monaghan; A. Moretti; G. Mule; L. Hornok; E. Beki;J. Tatnell; A. Ritieni and S.G. Edwards. 2008. Relationship between the fungal complex causing Fusarium head blight and environmental conditions Phytop*athology* 98: 69-78.

Zhao S. and C. Yao. 1989. On the sea temperature prediction models of the prevailing level of wheat scab. Acta Phytopathologica Sinica, 19: 229-234.

Zoldan, S.M. 2008 a. Regioes de risco, caracterizacao da antese em cereais de inverno e sistema de alerta para a Giberela, em trigo. Capítulo II Zoldan S.M. e Reis E.M.: zoneamiento de ocurrencia da Giberela em trigo, no sul do Brazil. Tesis título de Doctor en Agronomía, área de Fitopatología. Universidad de Passo Fundo.

Zoldan, S.M. 2008 b. Regioes de risco, caracterizacao da antese em cereais de inverno e sistema de alerta para a Giberela, em trigo. Capítulo IV Zoldan S.M. e Reis E.M.: interacoes entre temperatura e duracao do molhamento das espigas sobre a intensidade da giberela em trigo. Tesis título de Doctor en Agronomía, área de Fitopatología. Universidad de Passo Fundo.