

Predicción de epidemias del oídio de la vid (*Uncinula necator* (Schwein) Burrill) mediante modelos basados en factores meteorológicos

Weather-based models for predicting grape powdery mildew (*Uncinula necator* (Schwein) Burrill) epidemics

Enrique J. A. Oriolani ¹, Ricardo C. Moschini ², Sergio Salas ¹, Malvina I. Martinez ²,
Santiago Banchemo ²

Originales: *Recepción*: 21/04/2014- *Aceptación*: 16/06/2015

RESUMEN

El oídio de la vid (*Vitis vinifera* L.), causado por *Uncinula necator* (Schwein) Burrill, es una enfermedad fúngica relevante en viñedos de la provincia de Mendoza, ocasionando pérdidas de producción y degradación de la calidad del fruto cosechado. Durante seis campañas agrícolas (2001/02; 2002/03; 2005/06; 2007/08; 2008/09; 2009/10), en un parral del cultivar susceptible Chenín (EEA INTA Mendoza, Luján de Cuyo), se observó la evolución de la incidencia del oídio en racimos (como tasa de incremento epidémica diaria), desde floración hasta envero. A partir de registros térmico-hídricos horarios (monitoreados con sensores ubicados en la parte superior del canopeo) se calcularon variables meteorológicas en los 15 días previos a cada observación del progreso de la epidemia. Con variables que integran efectos de la temperatura, humedad del aire y frecuencia de precipitaciones ligeras sobre el incremento de la enfermedad en función del tiempo, se ajustaron modelos de regresión logística para estimar las probabilidades de ocurrencia de tasas epidémicas categorizadas (severa, moderada y nula), logrando una precisión de predicción máxima de 92,5% (modelo bivariado, N=40). Las predicciones del modelo univariado (seleccionado por "Stepwise"; precisión de predicción: 87,5%) se validaron satisfactoriamente con la curva epidémica observada en 2000/2001. Los valores estimados por estos modelos podrían complementar a las observaciones epidémicas y emitir alarmas regionales que sustenten la toma de decisión de control químico.

Palabras claves

oídio de la vid • variables meteorológicas • modelos logísticos

-
- 1 E. E. A. Mendoza. INTA. San Martín 3853, Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina. eoriolani2001@yahoo.com.ar
 - 2 Instituto de Clima y Agua. CIRN. INTA Castelar. Argentina.

ABSTRACT

Powdery mildew, caused by *Uncinula necator* (Schwein) Burrill is one of the most damaging disease affecting grapevines (*Vitis vinifera* L.) in Mendoza and worldwide, reducing yield and fruit quality. Throughout six growing seasons (2001/02; 2002/03; 2005/06; 2007/08; 2008/09; 2009/10), powdery mildew incidence values (expressed as daily epidemic increment rates) were observed in clusters from flowering to onset of ripening (change of color of the grape berries), in a grapevine planted with the susceptible Chenin cultivar at the EEA INTA Mendoza (Luján de Cuyo). From hourly values of thermal-moisture elements recorded by upper canopy sensors, meteorological variables were calculated in the 15 previous days of each epidemic observation. Using variables which integrate the effects of air temperature and humidity and frequency of light precipitations over the epidemic progress, logistic models were adjusted for estimating the probability of occurrence of severe, moderate and nil epidemic increment rates, reaching maximum prediction accuracy of 92.5% (two variable models, N=40). Predicted values by the univariate model (selected by Stepwise procedure; prediction accuracy: 87.5%) were validated with the epidemic curve observed during 2000/2001 growing season. These model predictions could complement epidemic observations, giving regional scale to warning systems for improving the decision making process regarding disease chemical control.

Keywords

powdery mildew • meteorological variables • logistic models

INTRODUCCIÓN

Las áreas vitícolas argentinas se concentran al pie de la cordillera de los Andes, favorecidas por un clima semidesértico caracterizado por inviernos secos, veranos cálidos y alta heliofanía. El 70% de la superficie total Argentina implantada con vid se encuentra en la provincia de Mendoza (19).

El oídio de la vid (*Vitis vinifera* L.), causado por el hongo *Uncinula necator* (Schwein.) Burril (sin. *Erysiphe necator* Schwein) (anamorfo *Oidium tuckeri* Berk.), es considerada una de las enfermedades más graves de los viñedos. Fue citada por primera vez en la región de Cuyo en 1875 (15). El oídio ocasiona pérdidas de producción y también degradación de la calidad del fruto cosechado. Gadoury *et al.* (2001) encontraron

reducciones significativas en los niveles de azúcar (porcentaje de sólidos solubles a cosecha) y en la calidad del jugo (menor color y mayor acidez) de bayas de *Vitis labruscana* afectados por oídio, incrementándose este impacto en viñedos de alta producción.

En cultivares tintos, los frutos infectados al inicio de la madurez alcanzan menor contenido de compuestos fenólicos o flavonoides (antocianinas y taninos), afectando las propiedades sensoriales de los vinos (6).

Uncinula necator es un parásito obligado (biotrófico), de alta especificidad respecto del hospedante, dado que solo prospera en la vid. Puede afectar todos los tejidos tiernos, incluyendo hojas, tallos, frutos e inflorescencias.

En las regiones vitícolas de Argentina, la forma de pasaje invernal del oídio es como micelio latente, protegido entre las pérulas de las yemas. El micelio invernanante de las yemas reanuda su crecimiento en primavera con la brotación de la planta, desde el cual se desarrollan los conidióforos que por divisiones sucesivas forman a los conidios.

En la temporada 2001/2002 se detectó la presencia de la forma sexual o teleomórfica del hongo en Mendoza, caracterizada por la formación de cleistotecios pardo oscuros, cerrados, con ascos en su interior conteniendo las ascosporas. Sobre la superficie de los cuerpos fructíferos se observan fulcras terminadas en uncínulos. Si bien los cleistotecios continúan formándose, desde el año 2002, la frecuencia de aparición ha disminuido considerablemente, al igual que la viabilidad de las ascosporas (19).

En áreas vitícolas mundiales húmedas las ascosporas son la principal fuente de inóculo primario. En Mendoza, bajo las condiciones ambientales relativamente secas como en la zona central y norte de Chile se considera que las epidemias de oídio se inician a partir de conidios formados en las hojas banderas, no obstante haber encontrado la formación de cleistotecios (2).

Varios estudios han demostrado que la resistencia ontogénica, desarrollada sobre las bayas pequeñas, detiene el progreso de la enfermedad con la maduración de los frutos, sugiriendo que la infección ocurre en estadios de desarrollo temprano de los racimos. Campbell *et al.* (2007) encontraron en Chile que el período crítico para el desarrollo del oídio se extiende desde el comienzo de la floración hasta la aparición de bayas con 7 mm de diámetro. Por ello estos autores recomiendan tratamientos con fungicidas en dicho lapso para lograr un control eficiente de la enfermedad (noviembre-diciembre en Santiago).

El crecimiento del micelio y la germinación de los conidios del oídio están fuertemente afectados por las condiciones meteorológicas. La enfermedad prospera muy bien bajo condiciones secas y temperaturas moderadas (21°C a 30°C). El hongo puede ser destruido completamente cuando la temperatura del aire excede los 32°C por 12 horas o más (26). Delp (1954) encontró que temperaturas superiores a 33,5°C inhiben la germinación de los conidios, mientras que la infección se reduce a temperaturas que sobrepasan los 31,5°C.

Durante dos campañas agrícolas en viñedos de Bordeaux (Francia) se observó que en días sin lluvia la dispersión de esporas de *Uncinula necator* fue diurna y con un patrón similar al de la velocidad del viento e inverso respecto de la humedad relativa del aire (25).

Basado en estudios epidemiológicos de laboratorio y campo, en la Universidad de California (Davis) se desarrolló un modelo de evaluación de riesgo del oídio de la vid. El sistema (22) está diseñado para ayudar a los productores a anticipar epidemias y así determinar más precisamente el momento de realizar tratamientos y reducir la aplicación de fungicidas (dos a tres aplicaciones menos a lo largo de la estación de crecimiento) (10).

En primer lugar, se pronostica la liberación de ascosporas basado en registros térmicos y duración de mojado foliar, estableciendo el inicio de la epidemia. Se pone en marcha el cálculo de un índice de riesgo al oídio de la vid basado enteramente en el efecto térmico sobre la tasa reproductiva (conidial) del patógeno.

El sistema fue satisfactoriamente probado en la zona central de Chile por Bendeck *et al.* (2007). No obstante, estos autores encontraron que la germinación de conidios de *Uncinula necator* es dependiente de ambos efectos, el térmico y el asociado a la humedad del aire.

El objetivo de este estudio fue ajustar modelos de regresión logística para estimar las probabilidades de ocurrencia de distintos niveles de tasas de incremento de incidencia de oídio de la vid en racimo en un cultivar susceptible, en base a variables meteorológicas calculadas en lapsos fijos previos a cada observación de progreso epidémico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Patometría de la incidencia de oídio de la vid. Cálculo de la tasa de incremento diario

Las observaciones de incidencia, se realizaron durante seis ciclos de cultivo (2001/02; 2002/03; 2005/06; 2007/08; 2008/09; 2009/10), en una parcela testigo (sin tratamiento) de un parral de vid del cultivar Chenín (susceptible) ubicado en la EEA INTA Mendoza, Luján de Cuyo, Los valores de incidencia se tomaron en racimos de plantas ubicadas en 5 subparcelas distribuidas en la parcela testigo.

La subparcela estaba compuesta de 4 plantas y en cada una de ellas, al inicio del ciclo vegetativo se marcaron 20 sarmientos, identificándose los racimos (40 por planta), donde se realizaron las observaciones del desarrollo de la epidemia cada 7 días a partir de floración-cuaje hasta el envero, estado fenológico, donde la enfermedad alcanza el valor máximo de incidencia en los racimos.

En la tabla 1 (pág. 201) se detalla por fecha de monitoreo (en día juliano) los valores acumulados de incidencia del oídio (IAc %) a lo largo de cada curva de progreso epidémico y las tasas de incremento diaria (TI %), para las seis campañas utilizadas para el desarrollo de modelos logísticos predictivos (N=40).

La tasa de incremento epidémico diario (TI %) surge de la diferencia entre el valor acumulado (IAc %) en el tiempo t y el valor en $t-1$, dividido el número de días entre las dos observaciones.

Desarrollo de los modelos logísticos

Técnicas de regresión logística (13) se utilizaron para desarrollar modelos, basados en variables meteorológicas, para estimar las probabilidades de ocurrencia de niveles ordinales de las tasas de incremento diaria.

En los últimos años la regresión logística de respuesta binaria y ordinal ha sido usada ampliamente en la investigación epidemiológica (4, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 23).

Variable dependiente

Probabilidad de ocurrencia de niveles categorizados de tasa de incremento de incidencia de oídio de la vid.

Categorización

Ordenando en forma ascendente los 40 valores de tasa de incremento epidémico diario disponible, para las seis curvas epidémicas, los percentiles 25% y 50% alcanzaron los valores de 0 y 0,795% respectivamente. Estos umbrales fueron utilizados para categorizar las observaciones de TI % en: severa (S): $TI > 0,795\%$, moderada (M): $TI \leq 0,795\%$ y $> 0\%$ y nula (N): $TI = 0\%$.

Variables meteorológicas regresoras

Se calculó a partir de valores horarios de temperatura (Th), precipitación (Prh), humedad relativa (HRh) y duración de mojado (Mojh), registrados por sensores de una estación meteorológica automática ubicados en la parte superior del follaje del parral.

Tabla 1. Valores acumulados de incidencia del oídio de la vid (IAc%) y tasa diaria de incremento epidémico (TI%) observados en racimos de vid del cultivar Chenín (N=40) en la EEA INTA Mendoza (Luján de Cuyo), durante seis campañas. Fecha de observación en día juliano (DJ).

Table 1. Grape powdery mildew accumulated incidence (IAc%) and daily epidemic increment rate (TI%) observed in clusters of Chenin cultivar (N=40) in the EEA INTA Mendoza (Luján de Cuyo), during six growing seasons. Observation date in julian days (DJ).

Campaña agrícola 2001/02		Campaña agrícola 2002/03			Campaña agrícola 2005/06			Campaña agrícola 2007/08			Campaña agrícola 2008/09			Campaña agrícola 2009/10			
DJ	IAc %	TI %	DJ	IAc %	TI %	Dj	IAc %	TI %	Dj	IAc %	TI %	DJ	IAc %	TI %	DJ	IAc %	TI %
318	0	0	316	0	0	320	0,7	0,09	316	0	0	311	0,0	0,0	336	19,3	2,76
325	0	0	323	0	0	328	58,9	7,29	324	0	0	318	4,34	0,62	343	32,31	1,859
332	0	0	330	0	0	335	96,8	5,4	330	2,4	0,4	325	30,06	3,67	350	85,71	7,63
339	0,2	0,03	337	0	0	340	96,8	0	338	86,5	10,5	331	54,95	4,15	362	100	1,19
346	3,8	0,51	344	34,4	4,91	347	98,2	0,20	345	99,4	1,84	339	96,35	5,175			
353	7,9	0,59	351	58,2	3,4	354	100	0,25									
360	27,5	2,8	360	70,1	1,32												
2	46,6	2,73	7	75,0	0,41												
9	57,5	1,56	14	81,8	0,97												
16	65,3	1,11															
23	72,6	1,04															

Las variables simples fueron calculadas en los 15 días precedentes a cada observación de TI %, en cada campaña. A continuación se describen las variables meteorológicas analizadas:

Variables simples

NPn1: número de períodos (negativos) de 1 día con registro de 9 h o más con $Th \leq 21,0^{\circ}C$ o $Th \geq 32,5^{\circ}C$ y $HRh < 80\%$; NPn2: número de períodos de 2 días consecutivos con registro de 9h o más con $Th \leq 21,0^{\circ}C$ o $Th \geq 32,5^{\circ}C$ y $HRh < 80\%$ en ambos días; NPn3: número de períodos de 3 días con registro de 9h o más con $Th \leq 21,0^{\circ}C$ o $Th \geq 32,5^{\circ}C$ y $HRh < 80\%$ en los tres días; NPP1: número de períodos (positivos) de 1 día con 9 h o más con registro simultáneo de $HRh > 17\%$ y $Th > 21,0^{\circ}C$ y $< 29,4^{\circ}C$; NPP2: número de períodos de 2 días consecutivos con 9 h o más con registro simultáneo de $HRh > 17\%$ y $Th > 21,0^{\circ}C$ y $< 29,4^{\circ}C$ en ambos días; NPP3: número de períodos de 3 días con 9h o más con registro simultáneo de $HRh > 17\%$ y $Th > 21,0^{\circ}C$ y $< 29,4^{\circ}C$ en los tres días; Prt1: valor total en milímetros de las precipitaciones horarias registradas en el intervalo: $Prh \geq 0,5$ mm y $Prh < 6$ mm; FPr1: frecuencia total de horas con registro de $Prh \geq 0,5$ mm y $Prh < 6$ mm; HRT: suma total de horas con $HRh > 17\%$; Mojt: suma total de horas con ocurrencia de mojado.

Diferencia entre dos variables simples

$Dif1 = NPP1 - NPn1$; $Dif2 = NPP2 - NPn2$;
 $Dif3 = NPP3 - NPn3$.

Análisis estadístico

Cálculo de coeficientes de correlación (rk) no-paramétrica de Kendall Tau-b

En la declaración PROC FREQ del SAS (20) entre los niveles ordinales de tasas

diarias de incremento epidémico y las variables meteorológicas analizadas.

Regresión logística

El procedimiento proc logistic del SAS (20) ajusta modelos de regresión a datos de respuesta binaria u ordinal por medio del método de máxima verosimilitud. Si se asume que PrS es la probabilidad de observar una tasa epidémica diaria severa (S) en una fecha de monitoreo, el modelo logístico, con X1 y IX1X2 (interacción) como predictores, puede ser escrito como: $\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS}) = \beta_0 + \beta_1 X1 + \beta_2 IX1X2$, en el cual β_0 a β_2 son parámetros y ln es el logaritmo natural. Resolviendo la expresión $\text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS}) / (1 + \text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})))$ se obtiene el valor de PrS. Luego, el procedimiento de regresión logística da una segunda ecuación por la cual se puede derivar la probabilidad acumulada de ocurrencia, un nivel igual o mayor al moderado (PrMac), siendo $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$.

La probabilidad de una tasa epidémica nula se calcula como: $\text{PrN} = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$. Si para una fecha de monitoreo específica PrS estimada es $> a$ PrM y a PrN entonces la fecha es clasificada como S (tasa epidémica severa). De la misma forma se realiza para PrM y PrN. Mediante el procedimiento PROC FREQ del SAS (20) se confeccionaron tablas de contingencia para calcular el número de casos en los cuales coincide el nivel de la tasa epidémica observada (S, M o N) con la predicha.

La precisión de predicción (Prec%) representa el porcentaje de fechas de monitoreo correctamente clasificadas con tasa epidémica S, M o N. El método de selección de variables "Stepwise" de proc logistic fue usado para obtener el modelo más apropiado, haciendo jugar las variables simples, fijando niveles de significancia de 0,05 para entrar (NSE) y permanecer (NSP) en el modelo.

Tanto el coeficiente de correlación de Kendal Tau-b como la precisión de

predicción de los modelos logísticos desarrollados fueron tomados en cuenta para la selección final de la longitud del período precedente a cada observación de TI % (se analizó longitudes de 10 a 15 días), de los umbrales de las variables meteorológicas evaluadas y de los valores de los percentiles utilizados como umbrales en la categorización de la variable respuesta (no se detalla este trabajo preliminar).

Validación

Los valores predichos por el modelo seleccionado por el procedimiento "Stepwise" fueron validados con los observados durante la campaña agrícola 2000/2001 (N=11). Solo

las observaciones de TI % del 10 de enero y 17 de enero resultaron no nulas (0,24 y 0,83% respectivamente).

RESULTADOS

Los valores mayores de correlación de Kendall se obtuvieron cuando las variables meteorológicas se calcularon en el lapso de 15 días previo a cada observación de tasa de incremento epidémico.

De acuerdo con la tabla 2, la variable meteorológica que alcanzó el valor más alto de correlación con la tasa de incremento epidémica diaria fue Dif2 (Npp2-NPn2) (rk=0,73), seguido por Dif1 (rk=0,72).

Tabla 2. Coeficientes de correlación (rk) de Kendall Tau-b entre los niveles ordinales de tasas diarias de incremento epidémico y variables meteorológicas.

Table 2. Kendall Tau-b correlation coefficients between ordinal levels of daily epidemic increment rates and meteorological variables

Variable	r _k	Variable	r _k
Dif2	0,73	Npp3	0,55
Dif1	0,72	FPr1	0,20
Dif3	0,70	Prt1	0,19
NPn3	-0,66	Prt3	-0,17
NPn2	-0,65	FPr3	-0,17
NPn1	-0,65	Mojt	0,05
Npp2	0,58	FPr2	0,04
Npp1	0,58	HRt	0,01

NPn1: número de períodos de 1 día con 9 h o más con registro simultáneo de Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80%; **NPn2:** número de períodos de 2 días con 9h o más con Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80% en ambos días; **NPn3:** número de períodos de 3 días con 9h o más con Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80% en los tres días; **Npp1:** número de períodos de 1 día con 9 h o más con registro simultáneo de HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C; **Npp2:** número de períodos de 2 días con 9h o más con HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C en ambos días; **Npp3:** número de períodos de 3 días con 9h o más con HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C en los tres días; *Diferencia entre dos variables simples:* **Dif1**=Npp1-NPn1; **Dif2**=Npp2-NPn2; **Dif3**=Npp3-NPn3. **Prt1:** valor total en milímetros de las precipitaciones horarias registradas en el intervalo: Prh>=0,5mm y Prh<6mm; **FPr1:** suma total de horas con Prh>=0,5mm y <6mm; **FPr2:** suma total de horas con Prh>=1mm y <6mm; **Prt3:** valor total en milímetros de las Prh>=6mm; **FPr3:** suma total de horas con Prh>=6mm; **HRt:** suma total de horas con HRh>17%; **Mojt:** suma total de horas con ocurrencia de mojado.

NPn1: number of 1 day periods with at least 9 h with simultaneous recording of Th<=21,0°C or Th>=32,5°C and HRh<80%; **NPn2:** number of 2 day periods with at least 9h with Th<=21,0°C or Th>=32,5°C and HRh<80% in both days; **NPn3:** number of 3 day periods with at least 9h with Th<=21,0°C or Th>=32,5°C and HRh<80% in the three days; **Npp1:** number of 1 day periods with at least 9 h with simultaneous recording of HRh>17% and Th>21,0°C and <29,4°C; **Npp2:** number of 2 day periods with at least 9h with HRh>17% and Th>21,0°C and <29,4°C in both days; **Npp3:** number of 3 day periods with at least 9h with HRh>17% and Th>21,0°C and <29,4°C in the three days; *Difference between two simple variables:* **Dif1**=Npp1-NPn1; **Dif2**=Npp2-NPn2; **Dif3**=Npp3-NPn3. **Prt1:** total value in millimeters of hourly precipitations greater or equal 0.5 mm and lower than 6 mm; **FPr1:** total hours with Prh>=0.5mm and <6mm; **FPr2:** total hours with Prh>=1mm and <6mm; **Prt3:** total value in millimeters of Prh>=6mm; **FPr3:** total hours with Prh>=6mm; **HRt:** total hours with HRh>17%; **Mojt:** total hours with wetness.

Otras siete variables presentaron valores de rk iguales o superiores a 0,55. Todas las variables mejor correlacionadas combinan el efecto térmico con el hídrico, este último asociado con la humedad relativa. Cuando las variables Npp1 (rk=0,58), Npp2 (rk=0,58) y Npp3 (rk=0,55) se calcularon sin incluir el efecto de la humedad relativa, los valores de los coeficientes de correlación de Kendall decrecieron a 0,56, 0,57 y 0,54 respectivamente.

Las variables estrictamente hídricas ligadas a la lluvia (Pr y FPr), a la duración de mojado (Mojt) y a la humedad relativa

del aire (HRT) se correlacionaron débilmente con la enfermedad, presentando valores de rk de 0,19, 0,20, 0,05 y 0,01 respectivamente.

El rk aumentó a 0,15, fijando umbrales inferiores y superiores de humedad relativa en la variable HRT de 17% y 87% respectivamente.

El mejor modelo univariado fue el I que incluyó a la variable Dif2 (87,5 % de precisión de predicción).

El procedimiento Stepwise de la regresión logística, corrido con todas las variables simples, seleccionó al modelo I como el más apropiado (tabla 3).

Tabla 3. Modelos logísticos para estimar las probabilidades de ocurrencia de niveles de tasas epidémicas diarias (severa (S), moderada (M) o nula (N)), usando variables meteorológicas.

Table 3. Weather-based logistic model for estimating the probabilities of occurrence of epidemic increment rate levels (severe (S), moderate (M) and nil (N)).

Modelo	Ecuaciones del modelo	Precisión de predicción %
I	$\text{Ln}(\text{PrS}/1-\text{PrS}) = -0,3378 + 0,6825 * \text{Dif2}$ $\text{Ln}(\text{PrMac}/1-\text{PrMac}) = 3,1954 + 0,6825 * \text{Dif2}$	87,5
II	$\text{Ln}(\text{PrS}/1-\text{PrS}) = -0,9098 + 0,7335 * \text{Dif2} + 0,1629 * \text{FPr1}$ $\text{Ln}(\text{PrMac}/1-\text{PrMac}) = 3,0928 + 0,7335 * \text{Dif2} + 0,1629 * \text{FPr1}$	90,0
III	$\text{Ln}(\text{PrS}/1-\text{PrS}) = -0,7944 + 0,7626 * \text{Dif2} + 0,2314 * \text{FPr2}$ $\text{Ln}(\text{PrMac}/1-\text{PrMac}) = 3,2169 + 0,7626 * \text{Dif2} + 0,2314 * \text{FPr2}$	92,5

Con la resolución de la expresión $\text{Exp}(\text{Ln}(\text{PrS}/1-\text{PrS})/(1+\text{Exp}(\text{Ln}(\text{PrS}/1-\text{PrS})))$ se obtiene PrS (probabilidad de observar una tasa epidémica severa en una fecha de monitoreo). Ln es el logaritmo natural. Con la resolución de $\text{Exp}(\text{Ln}(\text{PrMac}/1-\text{PrMac}) / (1+\text{Exp}(\text{Ln}(\text{PrMac}/1-\text{PrMac}))))$ se obtiene PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel de tasa epidémica => al moderado (M)). $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$. $\text{PrN} = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$ siendo PrN la probabilidad de observar una tasa epidémica nula (N).

Solving the expressions $\text{Exp}\{\text{Ln}[\text{PrS}/(1-\text{PrS})]\}/\{1+\text{Exp}\{\text{Ln}[\text{PrS}/(1-\text{PrS})]\}$ and $\text{Exp}\{\text{Ln}[\text{PrMac}/(1-\text{PrMac})]\}/\{1+\text{Exp}\{\text{Ln}[\text{PrMac}/(1-\text{PrMac})]\}$, PrS and PrMac are obtained. Ln is the natural logarithm. The probabilities of observing a moderate (M) or Null (N) epidemic result from the next two differences: $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$ and $\text{PrN} = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$.

Npp2: número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C en ambos días **Npn2:** número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80% en ambos días; **Dif2**=Npp2-Npn2; **FPr1:** suma total de horas con Prh>=0,5mm y <6mm; **FPr2:** suma total de horas con Prh>=1mm y <6mm;

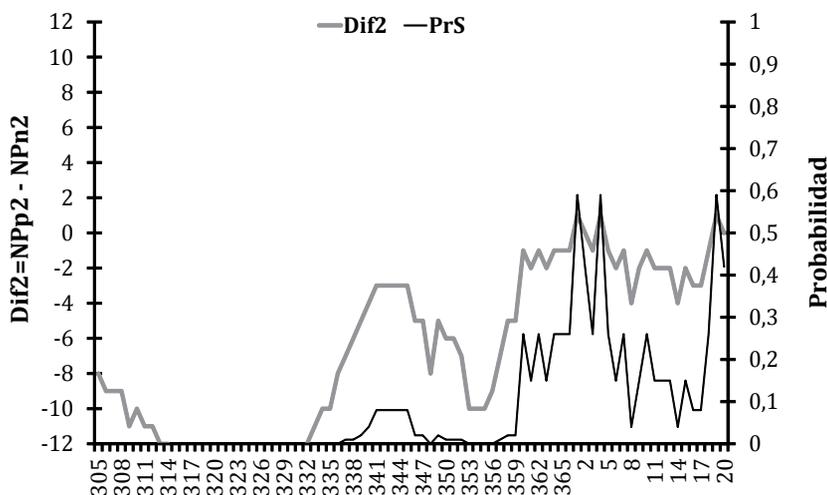
Npp2: number of 2 day periods with at least 9h with HRh>17% and Th>21.0°C and <29.4°C in both days; **Npn2:** number of 2 day periods with at least 9h with Th<=21.0°C or Th>=32.5°C and HRh<80% in both days; **Dif2**=Npp2-Npn2; **FPr1:** total hours with Prh>=0.5mm and <6mm; **FPr2:** total hours with Prh>=1mm and <6mm;

El modelo II que incluyó a Dif2 y a FPr1 (horas totales con Prh>=0,5 mm y <6 mm) permitió clasificar correctamente el 90% de las observaciones de tasa de incremento epidémica diaria categorizadas (36 de 40 casos).

Mayor precisión de predicción se obtuvo incorporando la variable FPr2 (Prh>=1 mm y <6 mm) a Dif2 (Modelo III). Este último modelo solo predijo incorrectamente 3 casos de los 40 (92,5% de precisión).

Validación:

En la figura 1 se graficó la evolución diaria de los valores de probabilidad de ocurrencia de una tasa de incremento epidémico severa (PrS) (Modelo I seleccionado por "Stepwise"; tabla 3, pág. 204) y de la principal variable regresora (Dif2: procesada en los correspondientes 15 días previos a cada día), para 2000/2001.



NPp2: número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C en ambos días. **NPn2:** número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80% en ambos días. **Dif2=NPp2-NPn2.**

NPp2: number of 2 day periods with at least 9h with HRh>17% and Th>21.0°C and <29.4°C in both days; **NPn2:** number of 2 day periods with at least 9h with Th<=21.0°C or Th>=32.5°C and HRh<80% in both days; **Dif2=NPp2-NPn2.**

Figura 1. Evolución de la probabilidad de ocurrencia de una tasa epidémica diaria severa (PrS) del oídio de la vid (estimada por modelo I, tabla 3, pág. 204) y de los valores de la principal variable predictora (Dif2=NPp2-NPn2) para la campaña 2000/2001 (reservada para validación).

Figure 1. Evolution of the probability of occurrence of severe daily epidemic rate (PrS) of grape powdery mildew (estimated by model I, table 3, page 204) and main predictor variable values (Dif2=NPp2-NPn2) for 2000/2001 growing season (reserved for validation purposes).

Los valores de PrS solo superan a PrM y PrN en las siguientes tres fechas: 1, 4 y 19 de enero, donde por única vez la variable Dif2 es positiva (valor 1) y en coincidencia con el incremento de la tasa epidémica observada en la primera quincena del mes.

Valores nulos o menores de PrS en relación con PrM y PrN se predijeron para los meses de noviembre y diciembre, en coincidencia con los valores nulos de incidencia observada en este período.

DISCUSIÓN

Algunas variables meteorológicas identificadas en este estudio lograron explicar fuertemente la variabilidad de las tasas de incremento de incidencia del oídio de la vid en racimo, a lo largo de la curva epidémica (hasta envero) en las campañas analizadas.

Se destacó especialmente NPn2 (relación inversa) y NPp2 (relación directa). La variable diferencia (Dif2) entre los días positivos para el incremento epidémico (NPp2) y los negativos (NPn2), resultó la que mejor explicó la variabilidad en los niveles de enfermedad ($r_k=0,73$).

Las variables meteorológicas identificadas en este trabajo fueron calculadas en los 15 días previos a cada observación de incremento epidémico, por haberse encontrado en este lapso los máximos valores de correlación con la enfermedad. Este intervalo de cálculo de las variables podría asociarse con lo encontrado por Bendek *et al.* (2007) en Chile. Estos autores observaron períodos de incubación de 13 a 14 días a 20°C o 23°C, en vides de las variedades Carmenere, Chardonnay y Merlot, las cuales resultaron igualmente susceptibles a *U. necator*.

Aunque superando los objetivos de este estudio, se concurda que a futuro podría ser de utilidad reemplazar el

período fijo de 15 días, en el cual se calculan las variables regresoras, por un período de incubación ajustado en función de la temperatura a lo largo de cada ciclo epidémico. En este sentido, Delp (1954) encontró que una nueva generación se puede desarrollar cada 5 a 7 días en el rango térmico 18,3°C-29,4°C, cada 32 días a 6,7°C y nunca a 32,2°C.

No obstante, el hecho que *U. necator* es un hongo xerofítico con capacidad de germinación de esporas con solo 20% de humedad relativa, Carroll y Wilcox (2003), trabajando a temperaturas óptimas (25°C +/- 2°C), concluyeron que la humedad juega un rol significativo en las epidemias de oídio en vid, confirmando los beneficios de prácticas de manejo que evitan y mitigan los efectos de altos niveles de humedad en el follaje de viñedos. Estos mismos autores encontraron que la enfermedad sobre follaje fue marcadamente afectada por niveles de humedad relativa en el rango de 39% a 98%.

Carroll y Wilcox (2003) también señalaron que la incidencia, severidad y frecuencia de germinación de los conidios presentó una relación lineal positiva hasta valores próximos a 85% de humedad relativa, progresando luego a tasas nulas o negativas.

A temperaturas de 20°C, Bendek *et al.* (2007) encontraron que la germinación de los conidios fue afectada por la humedad en el rango 33-35% a >95%, concluyendo que los conidios pueden iniciar epidemias de oídio en vid bajo condiciones de muy baja humedad y ausencia de agua externa. En este estudio, la variable Dif2, en la cual NPp2 fue calculada como el total de días con 9 h o más con simultáneo registro de HRh>17% y temperatura horaria entre 21°C y 29,4°C, alcanzó una correlación de Kendall de 0,731 y una precisión de predicción de 87,5%, cuando se incluyó

en un modelo de regresión logística univariado (modelo I).

En contraste ligero, al excluir el efecto de la humedad relativa horaria cuando se calcula Np2 (solo el condicional térmico), la variable Dif2 alcanzó un rk de 0,719 y una precisión de predicción de 85%. En cambio, el modelo bivariado III (Dif2 y FPr2) disminuyó marcadamente su precisión de predicción (de 92,5% a 80%) cuando no se consideró el efecto de la humedad relativa horaria al calcular Np2 en la variable Dif2.

En este trabajo las variables hídricas ligadas a la lluvia (expresadas en mm o frecuencia del evento) y a la duración de mojado (disponibilidad de agua libre por lluvia y/o rocío) mostraron muy bajos valores de correlación. Concordantemente, Cruz (2001) concluyó de varios estudios que la lluvia no es necesaria para la germinación de los conidios, teniendo en cambio un efecto desfavorable por arrastre de los conidios al suelo o por la rotura del micelio en respuesta a la energía de las gotas. El agua libre provoca una germinación anormal y reducida de los conidios, que pueden estallar por una excesiva turgencia. Asociada a la energía de las gotas de lluvia, en el presente estudio, se observó la respuesta diferencial del patógeno a precipitaciones horarias ligeras inferiores a 6 mm (rk de FPr1 y FPr2 positivas) contrastando con el comportamiento de la variable que calcula la frecuencia de precipitaciones iguales o mayores a 6 mm (rk de FPr3=-0,17).

El índice de riesgo de oídio de la vid desarrollado en la Universidad de California (Davis) (22), no utiliza la humedad para explicar la variación en los niveles de infección por conidios. Asume que la tasa de producción de conidios se incrementa con registros térmicos horarios entre 21,1°C y 29,4°C. Este

sistema de alarma fue probado en Chile para determinar el momento de aplicación de fungicidas en tres cultivares de vid. Fue posible mantener o mejorar el control del oídio, reduciendo en uno a tres los tratamientos químicos.

Se concluyó que la germinación de los conidios de *U. necator* de Chile fue dependiente de la temperatura y humedad en un amplio rango (2).

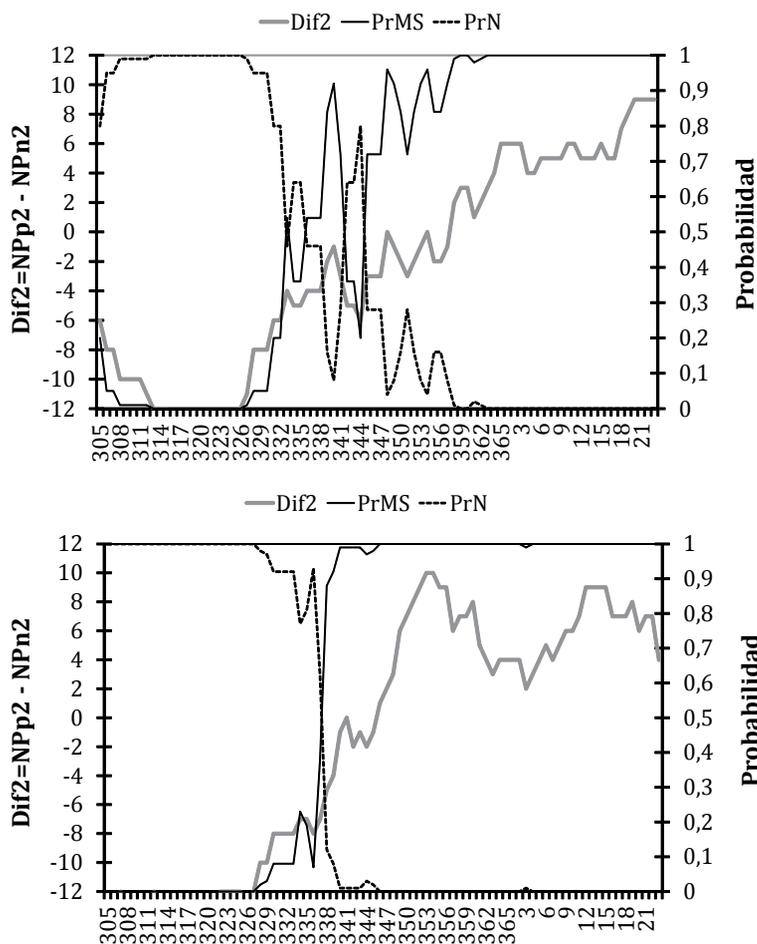
Para las campañas agrícolas 2001/02 y 2002/03 (figura 2, pág. 208) se graficó la evolución diaria de los valores de probabilidad de ocurrencia de una tasa de incremento epidémico moderada a severa (PrMS) y nula (PrN) (Modelo III de la tabla 3, pág. 204), junto al progreso diario de la principal variable regresora (Dif2: procesada en los correspondientes 15 días previos a cada día).

Se observó buena correspondencia entre las curvas de PrMS y de la variable Dif2, explicando satisfactoriamente la variación de las tasas de incremento epidémicas observadas. En ciclo agrícola 2001/2002, desde el 1/11/2001 (DJ: 305) al 28/11 (DJ: 332) no se registró un ambiente favorable para la infección (Dif2<=-6).

Seguidamente, hasta 23/12 (DJ: 357) se alternaron condiciones meteorológicas que favorecieron tasas epidémicas nulas (Dif2 <=-5) y moderadas (Dif2 osciló entre -4 a 1).

En el resto del ciclo hasta enero la situación ambiental fue conducente a niveles severos de incremento epidémico (Dif2>=2). La frecuencia de precipitaciones horarias entre 1 mm y 6 mm fue nula, por ello este factor no interaccionó con Dif2 para explicar las variaciones epidémicas.

En la campaña agrícola 2002/03, en el lapso 1/11/2002 al 3/12/2002 (DJ: 337) no se presentaron condiciones ambientales favorables para la infección (Dif2<-7).



NPp2: número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de HRh>17% y Th>21,0°C y <29,4°C en ambos días **NPn2:** número de períodos de 2 días con 9h o más con registro simultáneo de Th<=21,0°C o Th>=32,5°C y HRh<80% en ambos días. **Dif2=NPp2-NPn2.**

NPp2: number of 2 day periods with at least 9h with HRh>17% and Th>21.0°C and <29.4°C in both days; **NPn2:** number of 2 day periods with at least 9h with Th<=21.0°C or Th>=32.5°C and HRh<80% in both days; **Dif2=NPp2-NPn2.**

Figura 2. Evolución de las probabilidades de ocurrencia de una tasa epidémica diaria moderada-severa (PrMS) y nula (PrN) del óidio de la vid (estimadas por modelo III, tabla 3, pág. 204) y de los valores de la principal variable predictora Dif2 (NPp2-NPn2) para las campañas 2001/2002 (arriba) y 2002/2003 (abajo).

Figure 2. Evolution of the probabilities of occurrence of a grape powdery mildew moderate-severe (PrMS) and nil (PrN) daily epidemic rate (estimated by model III, table 3, page 204) and the main predictor variable values (Dif2=NPp2-NPn2) for 2001/2002 (upper) and 2002/2003 (below) growing seasons.

El 4/12/2002 (DJ: 338), con valores de Dif2 de -5 y 11 horas totales con precipitaciones entre 1 y 6 mm, se generaron tasas de incremento epidémicas moderadas, alternando luego con severas a partir de ocurrencias simultáneas de Dif2=-2 y FPr=15 horas. Este tipo de seguimiento diario debe realizarse a partir de la aparición de racimos hasta envero, pudiendo de esta forma dar alarmas de riesgo ambiental, sustentando la toma de decisión de control químico. Se verificaría así un incremento de la sustentabilidad del sistema vitícola de Mendoza asociado a la reducción del uso de fungicidas, mejorando los indicadores económico-ambientales (1).

Software amigable de libre disponibilidad se está elaborando (http://climayagua.inta.gob.ar/modelos_inta) para la carga de los datos meteorológicos, corrida de los modelos y salidas gráficas.

Otros componentes del tetraedro epidémico deberá tenerse en cuenta para la decisión de control químico como el comportamiento respecto de la enfermedad del cultivar de vid implantado, sistemas de conducción del hospedante y otros. También se remarca que la información meteorológica de paso horario necesaria para correr los modelos predictivos desarrollados, fue generada por una estación automática con sensores ubicados dentro del follaje del cultivar Chenín, conducido en parral. Estas predicciones sitio específico se deberán validar/ajustar cuando se pretende extrapolarlas a otros sitios de producción.

Las variables de los modelos a validar se podrán calcular a partir de registros meteorológicos horarios obtenidos de sensores ubicados dentro del follaje (como en el presente estudio y en el modelo californiano (10, 22)) o de sensores de estaciones ubicadas fuera del viñedo (21).

El modelo de Snyder *et al.* (1983) fue desarrollado en California para indicar el momento de aplicación de azufre en base a índices de riesgo al oídio calculados a partir de registros diarios de temperaturas máxima y mínima y precipitación de la red regional de estaciones meteorológicas.

Para los oasis de Mendoza, utilizando la red provincial de estaciones, se recomendarán análisis de sensibilidad para detectar el mejoramiento de la precisión de predicción, ante cambios en los umbrales de temperatura-humedad de las variables meteorológicas de los modelos seleccionados.

Las epidemias de oídio de la vid ajustan a un modelo policíclico con desarrollo exponencial, con la tasa de incremento dependiente del estado fenológico del hospedante (en este estudio el cultivar Chenín es susceptible) y factores ambientales (24). También la epidemia actual depende de la cantidad de inóculo inicial, asociada al nivel de infección del año previo.

En el presente estudio se aisló el efecto de la componente ambiental sobre la evolución de los niveles epidémicos (categorizados ordinalmente) analizando sólo seis curvas epidémicas anuales en un sitio, bajo el supuesto que las tasas diarias de incremento epidémico calculadas en cada fecha de observación (N=40) son suficientemente independientes entre sí. Esta última aseveración se afirma en el hecho de que las curvas epidémicas utilizadas (tabla 1, pág. 201) observan patrones de evolución diferentes, sin mostrar necesariamente mayores tasas de incremento al final de cada ciclo.

También, se supuso en este estudio que la sobrevivencia invernal del inóculo pudo sostener una fuerte presión de inóculo desde el inicio de cada una de las curvas de progreso epidémico, dejando al componente ambiental como el factor principal en la expresión de la enfermedad.

CONCLUSIONES

En condiciones naturales y utilizando técnicas de regresión logística, se cuantificó el efecto de variables ambientales sobre las tasas de incremento diaria (variable respuesta ordinal) de la incidencia en racimo del oídio de la vid.

Los modelos de regresión logística desarrollados, basados en variables térmico-hídricas calculadas en lapsos de 15 días previos a cada fecha de predicción,

estiman las probabilidades de ocurrencia de tasas epidémicas categorizadas (severa, moderada y nula).

El seguimiento de la evolución diaria de dichas probabilidades hasta enero, sustentaría la emisión de alarmas regionales que apoyen la toma de decisión de control químico de la enfermedad, junto a otros factores.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abraham, L.; Alturria, L.; Fonzar, A.; Ceresa, A.; Arnés, E. 2014. Propuesta de indicadores de sustentabilidad para la producción de vid en Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(1): 161-180.
2. Bendek, C. E.; Campbell, P. A.; Torres, R.; Donoso, A.; Latorre, B. A. 2007. The risk assessment index in grape powdery mildew control decisions and the effect of temperature and humidity on conidial germination of *Erysiphe necator*- Spanish Journal of Agricultural Research. 5(4): 522-532.
3. Campbell, P. A.; Bendek, C. E.; Latorre, B. A. 2007. Risk of powdery mildew (*Erysiphe necator*) outbreaks on grapevines in relation to cluster development. *Cien. Inv. Agr.* 34(1): 1-6.
4. Carmona, M.; Moschini, R. C.; Cazenave, G.; Sautua, F. 2010. Relación entre la precipitación registrada en estados reproductivos de la soja y la severidad de *Septoria glycines* y *Cercospora kikuchii*. *Tropical Plant Pathology-Fitopatología Brasileira.* 35(2): 71-78.
5. Carroll, J. E.; Wilcox, W. F. 2003. Effects of humidity on the development of grapevine powdery mildew. *Phytopathology.* 93: 1137-1144.
6. Cruz, M. 2001. Oídio de la vid. En: Oídios(Stadnik M.J., Rivera M., eds.). EMBRAPA, Jaguariuna, SP, Brasil. 261-380.
7. Delp, C. J. 1954. Effect of temperature and humidity on the grape powdery mildew fungus. *Phytopathology.* 44: 615-626.
8. De Wolf, E. D.; Madden L. V.; Lipps, P. E. 2002. Risk assessment models for wheat fusarium head blight epidemics based in within-season weather data. *Phytopathology.* 93: 428-435.
9. Gadoury, D. M.; Seen, R. C.; Pearson, R. C.; Wilcox, W. F.; Dunst, R. M. 2001. Effects of powdery mildew on vine growth, yield and quality of Concord grapes. *Plant Disease.* 85: 556-563.
10. Gubler, W. D.; Rademacher, M. R.; Vasquez, S. J.; Thomas, C. S. 1999. Control of powdery mildew using the UC Davis powdery mildew risk index. APSnet Feature. Published on line. The American Phytopathology Society. St. Paul. MN.
11. Harikrishnan, R.; Del Río, L. E. 2008. A logistic regression model for predicting risk of White mold incidence on dry bean in North Dakota. *Plant Dis.* 92: 42-46.
12. Henderson, D.; Williams, C. J.; Miller, J. S. 2007 Forecasting late blight in potato crops of southern Idaho using logistic regression analysis. *Plant Dis.* 91: 951-956.
13. Hosmer, D. W.; Lemeshow, S. 2000. Applied logistic regression. John Willey and Sons. Imc. 292 p.
14. Martínez, M. I.; Moschini, R. C.; Barreto, D.; Bodega, J. L.; Comerio, R.; Forjan, H.; Piatti, F.; Presello, D. A.; Valentinuz, O. R. 2010. Factores ambientales que afectan el contenido de fumonisinas en granos de maíz. *Tropical Plant Pathology.* 35(5): 277-284.

15. Mila, A. L.; Carriquiry, A. L.; Yang, X. B. 2004. Logistic regresión modeling of prevalence of soybean Sclerotinia stem rot in the north-central region of the United States. *Phytopathology*. 94: 102-110.
16. Moschini, R. C.; Sisterna, M. N.; Carmona, M. 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.
17. Moschini, R. C.; Canteros, B. I.; Martínez, M. I.; De Ruyver, R. 2014. Quantification of the environmental effect on citrus canker intensity at increasing distances from a natural windbreak in northeastern Argentina. *Australasian Plant Pathol.* 43: 653-662.
18. Paul, P. A.; Munkvold, G. P. 2004. A model-based approach to preplanting risk assessment for gray leaf spot of maize. *Phytopathology*. 94: 1350-1357.
19. Pizzuolo, P.; Lucero G.; Hapon, M. V.; Linardelli, C. 2008 Importancia de los distintos reservorios del pasaje invernal del teleomorfo de *Erysiphe necator* en viñedos de Mendoza. *Revista Enología* N° 2, año V, Mayo-Junio.
20. SAS Institute Inc., SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute INC., 1989. 846 p.
21. Snyder, R. L.; La Vine, P. D.; Sall, M. A.; Wrynski, J. E.; Schick, F. J. 1983. Grape mildew control in the Central Valley of California using the powdery mildew index. U.C. Cooperative Extension leaflet 21342
22. Thomas, C. S.; Gubler W. D.; Leavitt, G. 1994. Field testing of a powdery mildew disease forecast model on grapes in California. *Phytopathology*. 84: 1070 (abstr.).
23. Turechek, W. W.; Stevenson, K. L. 1998. Effects of host resistance, temperature, leaf wetness duration and leaf age on infection and lesion development of pecan scab. *Phytopathology*. 88:1294-1301.
24. Van Der Plank, J. E. 1963. *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press, Pretoria, South Africa. 349 p.
25. Willocquet, L.; Clerjeau, M. 1998. An analysis of the effects of environmental factors on conidial dispersal of *Uncinula necator* (grape powdery mildew) in vineyards. *Plant Pathology* 47: 227-233.
26. Ypema, H. L.; Gubler, W. D. 1997. Long-term effect of temperature and triadimefon on proliferation of *Uncinula necator*. Implications for fungicide resistance and disease risk assessment. *Plant Dis.* 81: 1187-1192.