

RENDIMIENTO DE PAPA EN FUNCIÓN DE EPIDEMIA POR TIZÓN TARDÍO (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary)

POTATO YIELD WITH REGARD TO LATE BLIGHT (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) EPIPHYTOTICS

Gaspar Romero Montes¹, Héctor Lozoya Saldaña^{2*}, Gustavo Mora Aguilera³, Sylvia Fernández Pavia⁴ y Niklaus J. Grünwald⁵

¹BASF Mexicana. Insurgentes sur 975, 03710, México D.F. ²Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. 56230, Chapingo, Méx. Tel. 01 (595) 952-1500 Ext. 6135. ³Instituto de Fitosanidad, Colegio de Posgraduados-Campus Montecillo. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx. ⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Km. 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro. 58880, Tarímbaro, Mich. ⁵Horticultural Crops Research Laboratory, USDA ARS, Dept. Botany & Plant Pathology, Oregon State University. 3420 NW Orchard Ave, Corvallis, OR, 97330, USA.

*Autor para correspondencia (picti87@gmail.com)

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar la relación cuantitativa entre el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) de dos cultivares ('Alpha', susceptible, y 'Zafiro', moderadamente resistente al tizón tardío), y la severidad del patógeno en Toluca, México, que se manejó mediante aplicaciones semanales de 0.575 kg i.a ha⁻¹, 1.15 kg i.a ha⁻¹ y sin aplicación, del fungicida Clorotalonil. Hubo diferencias estadísticas entre cultivares y entre dosis del fungicida en un mismo cultivar ($P < 0.05$). La relación entre el rendimiento y la severidad de la enfermedad se describe por modelos de regresión lineal. El rendimiento por categorías comerciales ("primera", "segunda" y "tercera") estuvo en función de la severidad acumulada a los 80 d después de la siembra en el cultivar 'Zafiro', y a los 58 d en 'Alpha' para "primeras"; y para el total, a los 65 d para "segundas" y a los 94 d para "terceras". El coeficiente de determinación varió entre 54 y 78 % en los modelos de 'Alpha', mientras que en 'Zafiro' fue de 54 a 75 %. La pérdida en rendimiento fue menor en 'Zafiro', pues sus epifitias fueron menos intensas hasta al inicio de la tuberización. Se concluye que es necesario considerar al inicio de tuberización como punto crítico. El periodo previo es el más importante para reducir pérdidas, por lo que el manejo deberá encaminarse a retrasar el inicio de las epifitias en esa etapa y de su intensidad.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, cvs. 'Alpha' y 'Zafiro', Toluca.

SUMMARY

In order to study the quantitative relationship between tuber yield of two potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars ('Alpha', susceptible, and 'Zafiro', moderately resistant to late blight), and severity of the pathogen in Toluca, México, managed by weekly foliar sprays of 0.575 kg i.a ha⁻¹, 1.15 kg i.a ha⁻¹, and without application of the fungicide Clorotalonil. There were statistical differences between cultivars and among treatments within each cultivar ($P < 0.05$). The relationship between yield and disease severity was described by linear regression models. Yield by commercial standards (classes 1, 2 and 3) depended on the accumulated severity 80 d after planting in cv. 'Zafiro', and at 58 d in 'Alpha' for class 1 and for total yield, at 65 d for class 2, and at 94 d for class 3. The determination coefficient varied between 54 and 78 %

in the selected models for 'Alpha', while in 'Zafiro' the range was from 54 to 75 %. Yield loss was less in 'Zafiro', for its epiphytotics were less intense until start of tuberization. It is concluded that it is necessary to consider tuber initiation as the critical point. The previous period is the most important to reduce losses. Hence, handling should focus on the delay of the epiphytotic initiation (Y_0) and intensity in this period (r_k).

Index words: *Solanum tuberosum* cultivars 'Alpha' and 'Zafiro', Toluca.

INTRODUCCIÓN

El tizón tardío (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) de la papa (*Solanum tuberosum* L.) ha devastado plantaciones de este cultivo por más de 150 años. En EE. UU., hace una década, el costo económico anual causado por la aplicación de fungicidas y las pérdidas económicas en el rendimiento fue valuado en más de 287 millones de dólares y una cuarta parte de ese costo correspondió al uso de fungicidas (Guenther *et al.*, 2001). En esa época tan solo en la cuenca de Columbia en ese país, se hacía un promedio de 18 aplicaciones de fungicidas por ciclo de cultivo, mientras que en el Valle de Toluca, México, los productores hacían de 16 a 24 aplicaciones por ciclo (Johnson *et al.*, 1997; Grünwald *et al.*, 2000). Tal número de aplicaciones, además de subir los costos de producción, aumentan el riesgo de afloramiento de variantes del patógeno resistentes a fungicidas (Grünwald *et al.*, 2006). Particularmente en el Valle de Toluca, el tizón representa un problema por las condiciones ambientales y la amplia diversidad genética del patógeno, los cuales propician epifitias de alta intensidad. Adicionalmente, por preferencia del productor, la mayor parte de la superficie se siembra con variedades susceptibles, y aunque existan variedades resistentes, éstas ocupan menos de 10 % de la

superficie sembrada (Rubio-Covarrubias *et al.*, 2000).

La pérdida en rendimiento se define como la diferencia entre el rendimiento actual obtenido y el rendimiento potencial alcanzable, donde éste se obtiene al utilizar eficaz y eficientemente las técnicas disponibles de control de plagas y enfermedades, a diferencia del rendimiento actual que se consigue en condiciones de pobre o nulo manejo fitosanitario (Nutter *et al.*, 1993). La pérdida también se define como la reducción medible en cantidad, calidad, o en ambos atributos del rendimiento (Madden *et al.*, 1981). La severidad de una enfermedad y las pérdidas en rendimiento han sido relacionadas cuantitativamente a través de modelos matemáticos, como los modelos de punto crítico, punto múltiple y sintéticos (o de área bajo la curva). La selección del modelo depende del objetivo del estudio; *i.e.*, identificación de las fases del cultivo en las que los patógenos inician o causan el mayor daño en el rendimiento, o para dar seguimiento a la epifitía y sus efectos (James, 1974; Savary *et al.*, 2006; Miller *et al.*, 2009).

Los modelos de punto crítico se han utilizado con éxito al predecir pérdidas en avena (*Avena sativa* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) causadas por el Virus del Enanismo Amarillo de la Cebada (BYDV, Bauske *et al.*, 1997; McKirdy *et al.*, 2002); en el caso de papa y tizón tardío, estos modelos no han funcionado (Waggoner y Berger, 1987). En Canadá se probó sin éxito un modelo desarrollado en Inglaterra, el cual suponía que con 75 % de severidad de la enfermedad se detenía el crecimiento de tubérculos (James *et al.*, 1971). Posteriormente se desarrolló un modelo de regresión

múltiple con mayor éxito para esa zona (James *et al.*, 1972). Shtienberg *et al.* (1990) desarrollaron un modelo general para medir pérdidas en rendimiento en papa; sin embargo, no es muy versátil ni de fácil aplicación. Además, la mayoría de los modelos para determinar pérdidas en rendimiento en papa se han desarrollado con base en el rendimiento total, sin considerar categorías por nivel de calidad del mismo (James *et al.*, 1971, 1972; Waggoner y Berger, 1987; Shtienberg *et al.* 1990).

Con base en lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron determinar la relación cuantitativa entre la severidad del tizón tardío y la producción de tubérculos de papa de diferentes categorías comerciales, en un cultivar susceptible y otro moderadamente resistente a esta enfermedad, así como identificar el punto crítico de ataque de mayor afectación en el rendimiento de tubérculo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron parcelas experimentales de 9 m de largo por 8.1 m de ancho (9 surcos, 36 plantas por surco) con 1.0 m de separación entre ellas (Figura 1), en un diseño factorial de 3 x 2 con arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones, en Metepec, Edo. de México, en los veranos de 2002 y 2003. Las parcelas grandes fueron las dosis de Clorothalonil: media (0.5), 0.575 kg i.a. ha⁻¹, completa (1), 1.15 kg i.a. ha⁻¹ y un tratamiento sin aplicación de fungicida. Las parcelas chicas fueron dos cultivares de papa: 'Alpha', susceptible a tizón tardío, y 'Zafiro', moderadamente resistente a esta enfermedad. Las dosis de fungicida se



Figura 1. Cultivo trampa (a), clon resistente a *P. infestans* (b), y planta infectada (c), en un ensayo de rendimiento de papa.

aplicaron con el fin de inducir variabilidad de severidad en la parcela, y no con el propósito de evaluar efectividad de control. Las plantas fueron infectadas en forma natural con *P. infestans*.

La siembra de tubérculos fue el 14 de junio en 2002 y el 12 de junio en 2003. La fertilización y aplicación de agroquímicos, excepto fungicidas, se hicieron de acuerdo con las recomendaciones técnicas para siembras comerciales locales (Rubio Covarrubias *et al.*, 2000). Los tratamientos con fungicidas se realizaron cada 7 d en las dosis programadas, con aspersoras manuales de mochila (Swissmex Solo, de 15 L, modelo 425).

Estimación de la severidad. La severidad promedio de la enfermedad se estimó en cada unidad experimental de manera visual cada 7 d, de acuerdo con la escala propuesta por The British Mycological Society y modificada por Fry (1977). En ambos años, la toma de datos se inició después de que 50 % de las plantas habían emergido.

Cosecha de tubérculos. Se llevó a cabo con tractor, el 15 noviembre de 2002 y el 10 de noviembre de 2003. Los tubérculos se separaron en tres categorías comerciales: “primera” (tubérculos \geq a 6 cm de diámetro), “segunda” (entre 3 y 6 cm) y “tercera” (\leq de 3 cm). El peso total de los tubérculos de cada categoría se obtuvo para cada parcela experimental. Los tubérculos malformados no se incluyeron en ninguna categoría, pero sí en el peso total. El rendimiento de las tres categorías comerciales y el total de cada tratamiento se transformaron a toneladas por hectárea.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza (PROC GLM, SAS Institute Cary, NC) para determinar diferencias en el rendimiento de cada categoría comercial y el total de producción entre cultivares y aplicaciones de fungicidas. La comparación de medias fue mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El principal propósito de este análisis fue determinar el efecto de los cultivares en el rendimiento, así como evaluar la efectividad de una inducción diferencial de severidad para justificar modelos independientes por cultivar.

La relación cuantitativa entre el rendimiento por parcela de cada cultivar y la respectiva severidad promedio de la enfermedad se obtuvo a través de modelos de regresión lineal. Se elaboraron diagramas de dispersión para relacionar los rendimientos con la severidad de la enfermedad, y con base a estos diagramas se ajustaron los modelos de regresión lineal simple. Así mismo, se calcularon correlaciones simples entre el rendimiento de cada categoría comercial y cada uno de los porcentajes de severidad de las distintas fechas (SAS 8.1, PROC REG, SAS Institute Cary, NC). Dado que hubo diferencias significativas de rendimiento entre cultivares, se

creó un modelo de regresión para cada categoría comercial en cada cultivar y para el rendimiento total en función del porcentaje de severidad de la enfermedad acumulado semanalmente. Los mejores modelos se escogieron con base en su bondad de ajuste, determinada por los valores de la estadística de F , el coeficiente de determinación (R^2) y la significancia de los parámetros β_0 y β_1 .

RESULTADOS

A la cosecha, todos los tratamientos con fungicida presentaron plantas infectadas (Figuras 2 y 3); sin embargo, el grado de severidad de la enfermedad fue diferente entre cultivares. En los dos años, ‘Alpha’ presentó entre 20 y 100 % de severidad, mientras que en ‘Zafiro’ fue de 0.5 a 90 %. En ambos cultivares los valores más bajos ocurrieron en los tratamientos con fungicida. En ‘Alpha’ el 100 % de severidad se alcanzó en parcelas sin protección química a los 57 y 50 d después de la siembra (dds) en 2002 y 2003, respectivamente; y con la dosis media de fungicida se tuvo una fluctuación de 60 a 90 % de severidad en 2002, mientras que en el 2003 varió de 20 a 50 %. Incluso, al aplicar la dosis completa, dos de las tres parcelas llegaron a 50 % de infección en ambos años. En ‘Zafiro’ sin fungicida, la infección alcanzó 90 % el primer año y 80 % el segundo, y en general los tratamientos con dosis media o completa casi no mostraron infección final del follaje.

El rendimiento total del cv. ‘Alpha’ en las parcelas donde no hubo aplicación de fungicida fue de 1.69 y 0.14 t ha⁻¹ en 2002 y 2003, respectivamente: los tubérculos con calidad comercial “tercera” fueron los que predominaron en ese tratamiento (Figuras 2 y 3). El cv. ‘Zafiro’ rindió 16.28 y 11.46 t ha⁻¹ para los mismos años en ausencia de fungicida, con predominio de la categoría “segunda”. En ambos cultivares el mayor rendimiento se obtuvo en los tratamientos con la dosis completa del fungicida: ‘Alpha’, 10.53 \pm 3.78 t ha⁻¹, ‘Zafiro’, 24.13 \pm 4.64 t ha⁻¹, con diferencias significativas ($P < 0.0001$) entre ambas.

En el análisis de varianza efectuado por cultivar se detectó que en ambos cultivares hubo diferencias estadísticas ($P < 0.03$) entre dosis de fungicidas para producción de tubérculos de las categorías de “primera”, “segunda” y para el rendimiento total, pero no en producción de “terceras” (Cuadro 1).

No se encontraron diferencias estadísticas en el rendimiento de las tres categorías en los tratamientos sin aplicación de fungicida respecto a los que tuvieron la dosis media en ambos cultivares, pero sí con respecto a los de dosis completa (Tukey, 0.05) (Cuadro 1). La mayor cantidad de pérdidas se encontró en los tratamientos sin fungicida. En general, ‘Zafiro’ mostró menor porcentaje de pérdidas que

Cuadro 1. Promedios, desviaciones estándar, cuadrados medio del error y niveles de significancia de producción de tubérculos de tres categorías comerciales en dos cultivares de papa naturalmente infectados con *Phytophthora infestans* en Toluca, México, sometidos a tres dosis de fungicida.

Cultivar	Categoría comercial [†]	Tratamiento ^{††}	Media ± desviación estándar ^{†††}	Cuadrado medio del error	Pr > F ^{††††}
'Alpha'	"Primera"	Al-0 a	0.02 ± 0.06	2.14	0.025
		Al-0.5 ab	2.10 ± 1.35		
		Al-1 b	2.43 ± 2.14		
	"Segunda"	Al-0 a	0.00 ± 0.00	3.56	0.001
		Al-0.5 a	4.11 ± 1.82		
		Al-1 b	4.76 ± 2.71		
	"Tercera"	Al-0 a	0.89 ± 0.96	1.70	0.090
		Al-0.5 a	2.68 ± 1.74		
		Al-1 a	3.34 ± 3.75		
	Total	Al-0 a	0.92 ± 0.97	8.05	0.001
		Al-0.5 a	8.90 ± 3.56		
		Al-1 b	10.53 ± 3.78		
'Zafiro'	"Primera"	Za-0 a	2.85 ± 1.20	4.15	< 0.001
		Za-0.5 a	7.72 ± 2.33		
		Za-1 b	9.51 ± 2.36		
	"Segunda"	Za-0 a	7.62 ± 2.05	5.16	< 0.012
		Za-0.5 ab	10.61 ± 2.02		
		Za-1 b	12.11 ± 2.68		
	"Tercera"	Za-0 a	3.4 ± 2.24	2.31	0.409
		Za-0.5 a	2.24 ± 0.71		
		Za-1 a	2.51 ± 1.20		
	Total	Za-0 a	13.87 ± 3.54	16.02	0.002
			20.58 ± 3.74		
			24.13 ± 4.64		

[†] Calidad por tamaños: "primera", tubérculos de > 6 cm diámetro; "segunda", 3-6 cm; "tercera", < 3 cm. ^{††} Al = cv. 'Alpha'; Za = cv. 'Zafiro'; 0, 0.5 y 1.0 = proporción de dosis de Clorothalonil. Tratamiento por categoría comercial y cultivar con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). ^{†††} La media y la desviación estándar son del rendimiento de cada categoría comercial en t ha⁻¹. ^{††††} Valores mayores a P > 0.05 no son significativos.

'Alpha' (Cuadro 2). Estos resultados demostraron la efectiva inducción de severidad en la parcela, y por tanto respaldan la generación de modelos de estimación de pérdidas.

La relación entre la severidad de la enfermedad y el rendimiento de cada categoría comercial fue mejor descrita con una función lineal. Todos los parámetros fueron significativos (P < 0.05); el valor de los coeficientes de determinación varió de 54 a 78 % en los modelos de 'Alpha', y de 54 a 75 % en los de 'Zafiro' (Cuadro 2, Figura 4).

La mayor correlación entre el rendimiento de cada categoría comercial y cada una de las severidades acumuladas registradas a lo largo de la epifitía, en el caso del cv. 'Alpha' (r > 0.7) fue con la severidad acumulada a los 58 dds, mientras que en 'Zafiro' fue con la severidad acumulada a los 80 dds, lo que puede deberse a que este cultivar es más tardío en su desarrollo fisiológico. Al construir los modelos de regresión del rendimiento en función de cada una de las severidades evaluadas a lo

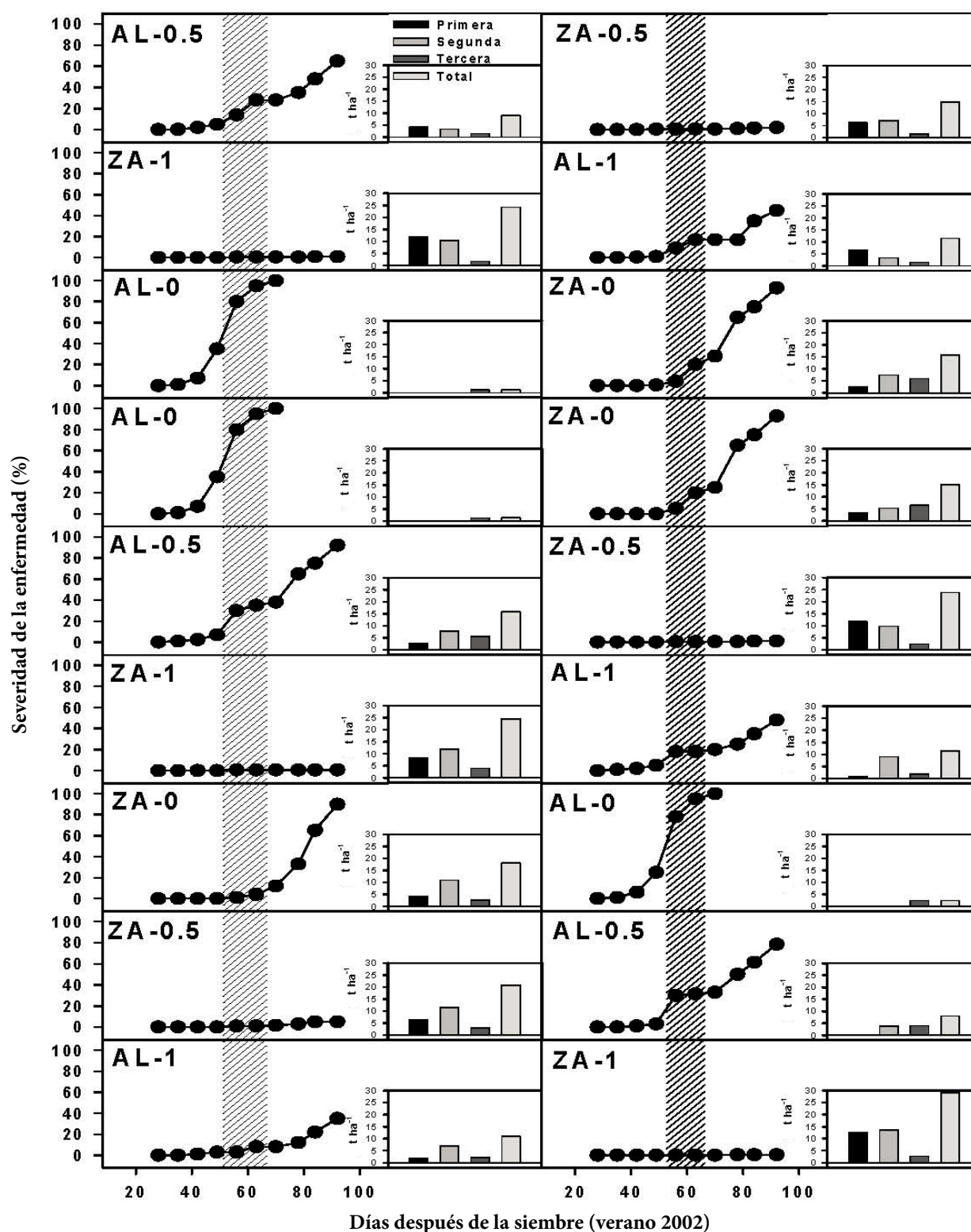


Figura 2. Porcentaje de severidad de tizón tardío y rendimiento en dos cultivares de papa asperjados con tres dosis de fungicida (Clorothalonil 1.15 kg i.a. ha⁻¹) durante el Verano del 2002. AL-0, 'Alpha' sin fungicida; AL-0.5, con media dosis de fungicida; AL-1 con dosis completa. ZA-0, 'Zafiro' sin fungicida; ZA-0.5, con media dosis; ZA-1, con dosis completa. La parte sombreada indica el inicio de tuberización (55-65 d después de la siembra). Esta distribución de tratamientos es similar a la del campo.

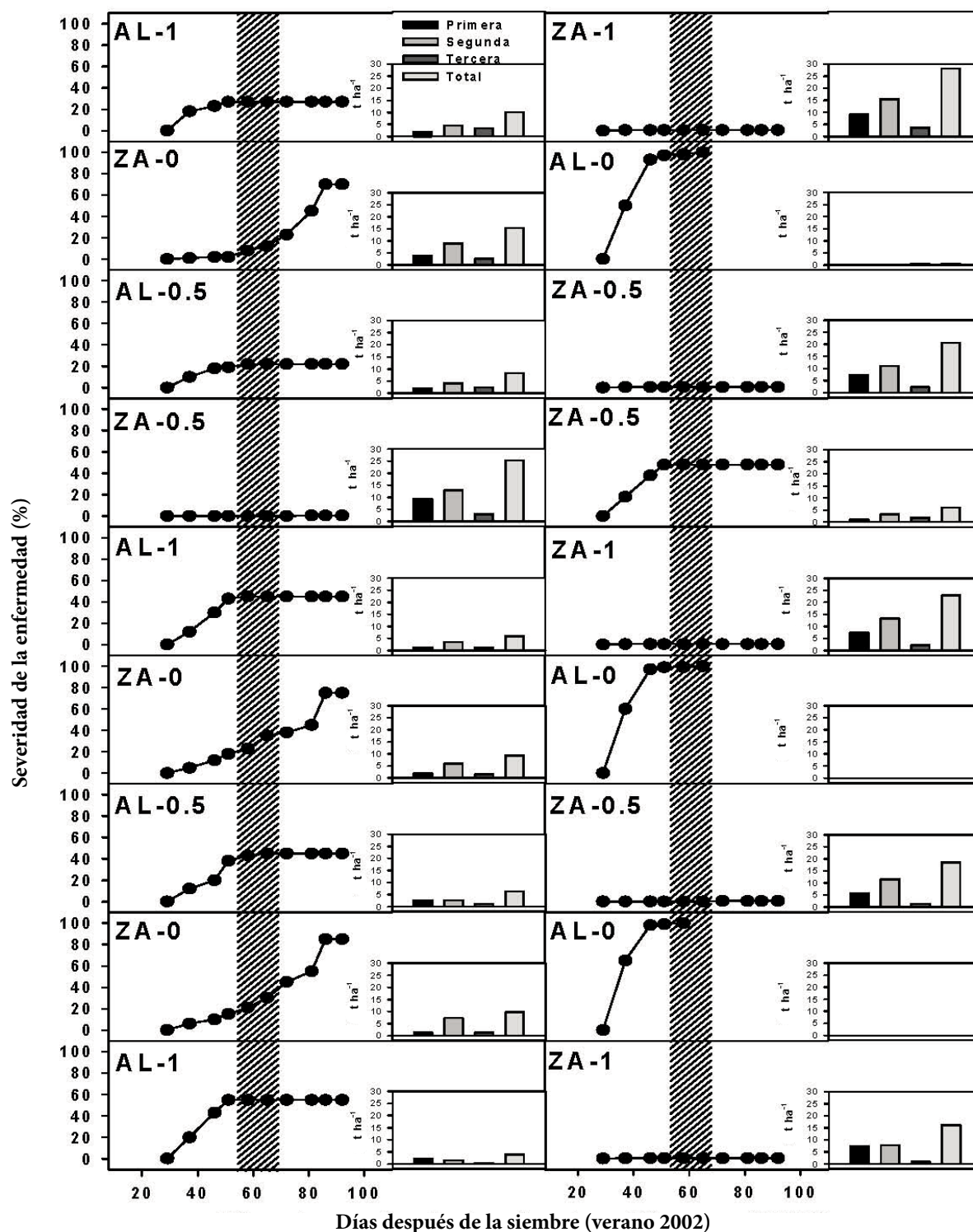


Figura 3. Porcentaje de severidad de tizón tardío y rendimiento en dos cultivares de papa asperjados con tres dosis de fungicida (Clorotalonil 1.15 kg i.a. ha⁻¹) durante el Verano del 2003. AL-0, 'Alpha' sin fungicida; AL-0.5, con media dosis de fungicida; AL-1, con dosis completa. ZA-0, 'Zafiro' sin fungicida; ZA-0.5, con media dosis; ZA-1, con dosis completa. La parte sombreada indica el inicio de tuberización (55-65 d después de la siembra). La distribución de los tratamientos en el cuadro es similar a la del campo.

Cuadro 2. Modelos de punto crítico de estimación de producción de tubérculos categorizados en tres niveles de calidad comercial, en dos cultivares de papa con diferente nivel de resistencia a *P. infestans*.

Cultivar [†]	Categoría comercial ^{††}	Modelo ^{†††}	r ²	Pr > F (Modelo)	Pr > F (β_0, β_1)
'Alpha'	"Primera"	$y_1 = 2.29 - 0.023 (\text{Sev}5)$	0.54	0.0011	0.0001, 0.0011
	"Segunda"	$y_2 = 5.24 - 0.051 (\text{Sev}6)$	0.67	0.0002	0.0001, 0.0002
	"Tercera"	$y_3 = -0.087 + 0.061 (\text{Sev}10)$	0.7	0.0006	0.0001, 0.0006
	"Total"	$y_t = 11.22 - 0.11 (\text{Sev}5)$	0.78	0.0001	0.0001, 0.0001
'Zafiro'	"Primera"	$y_1 = 8.57 - 0.106 (\text{Sev}8)$	0.61	0.0001	0.0001, 0.0001
	"Segunda"	$y_2 = 11.66 - 0.086 (\text{Sev}8)$	0.75	0.0001	0.0001, 0.0001
	"Tercera"	$y_3 = 2.49 - 0.13 (\text{Sev}8) + 0.0028 (\text{Sev}8^2)$	0.58	0.0013	0.001, 0.0027
	Total	$y_t = 21.62 - 0.1484 (\text{Sev}8)$	0.54	0.0025	0.0001, 0.0025

[†] La infección por *P. infestans* fue natural, con severidades máximas de 22-100 % y de 0.5-90 % en 'Alpha' y 'Zafiro', respectivamente. La intensidad de la severidad diferencial se indujo mediante la aplicación de dosis programadas y controladas de fungicida. ^{††} Las categorías comerciales se basaron en tamaños: "primera", tubérculos de > 6 cm de diámetro; "segunda", entre 3 y 6 cm; "tercera", < 3 cm. ^{†††} Solo se incluyeron los modelos de regresión lineal con mejor bondad de ajuste. Se excluyeron aquellos con estimaciones de severidad correspondientes a fases fenológicas con ajuste pobre y los modelos polinomiales. El porcentaje de severidad utilizado fue el acumulado a los 58 d (Sev5), 65 d (Sev6), 80 d (Sev8) y 94 d (Sev10) después de la siembra; y_i = producción de tubérculos.

Cuadro 3. Estimación de pérdidas en rendimiento de tubérculos (%) en dos cultivares de papa sometidos varios porcentajes de severidad acumulados durante el periodo de inicio de tuberización.

Severidad acumulada (%)	Pérdidas en rendimiento (%) [†]					
	'Alpha' ^{††}			'Zafiro' ^{†††}		
	"Primera"	"Segunda"	Total	"Primera"	"Segunda"	Total
5	5.02	4.87	4.90	6.18	3.69	3.43
10	10.04	9.73	9.80	12.37	7.38	6.86
20	20.09	19.47	19.61	24.74	14.75	13.73
30	30.13	29.20	29.41	37.11	22.13	20.59
40	40.17	38.93	39.22	49.47	29.50	27.46
50	50.22	48.66	49.02	61.84	36.88	34.32
60	60.26	58.40	58.82	74.21	44.25	41.18
70	70.31	68.13	68.63	86.58	51.63	48.05
80	80.35	77.86	78.43	98.95	59.01	54.91
90	90.39	87.60	88.24	100.00	66.38	61.78
100	100.00	97.33	98.04	100.00	73.76	68.64

[†] El rendimiento se dividió en tres categorías comerciales: "primera" (tubérculos > 6cm); "segunda" (tubérculos entre 3-6cm); "tercera" (tubérculos < 3cm). No hubo pérdidas en la categoría comercial "tercera", por lo que no se incluyó. ^{††} Porcentaje de pérdidas predichas en el cv. 'Alpha' de acuerdo con los modelos: $y_1 = 100 - [(2.29 - 0.023(\text{Sev}5))100/2.29]$; $y_2 = 100 - [(5.24 - 0.051(\text{Sev}6))100/5.24]$; $y_3 = 100 - [(11.22 - 0.11(\text{Sev}5))100/11.22]$. Los modelos se crearon con base en el porcentaje de severidad acumulado a los 58 (Sev5) y 65 d (Sev6) después de la siembra. ^{†††} Porcentaje de pérdidas predichas en el cv. 'Zafiro' de acuerdo con los modelos: $y_1 = 100 - [(8.57 - 0.106(\text{Sev}8))100/8.57]$; $y_2 = 100 - [(11.66 - 0.086(\text{Sev}8))100/11.66]$; $y_3 = 100 - [(21.62 - 0.1484(\text{Sev}8))100/21.62]$. Los modelos se crearon con base en el porcentaje de severidad acumulado a los 80 d (Sev8) después de la siembra.

largo de la epifitía, se encontró que los modelos con mejor coeficiente de determinación y cuyos parámetros fueron significativos coincidieron con la severidad donde hubo mayor correlación con el rendimiento, que en el caso de 'Alpha' coincidió con el inicio de tuberización, y en 'Zafiro'

estuvo cercano a ese periodo.

Las pérdidas predichas por los modelos fueron mayores en la categoría comercial "primera" (Cuadro 3). En el caso de la categoría "tercera" no se registraron pérdidas reales

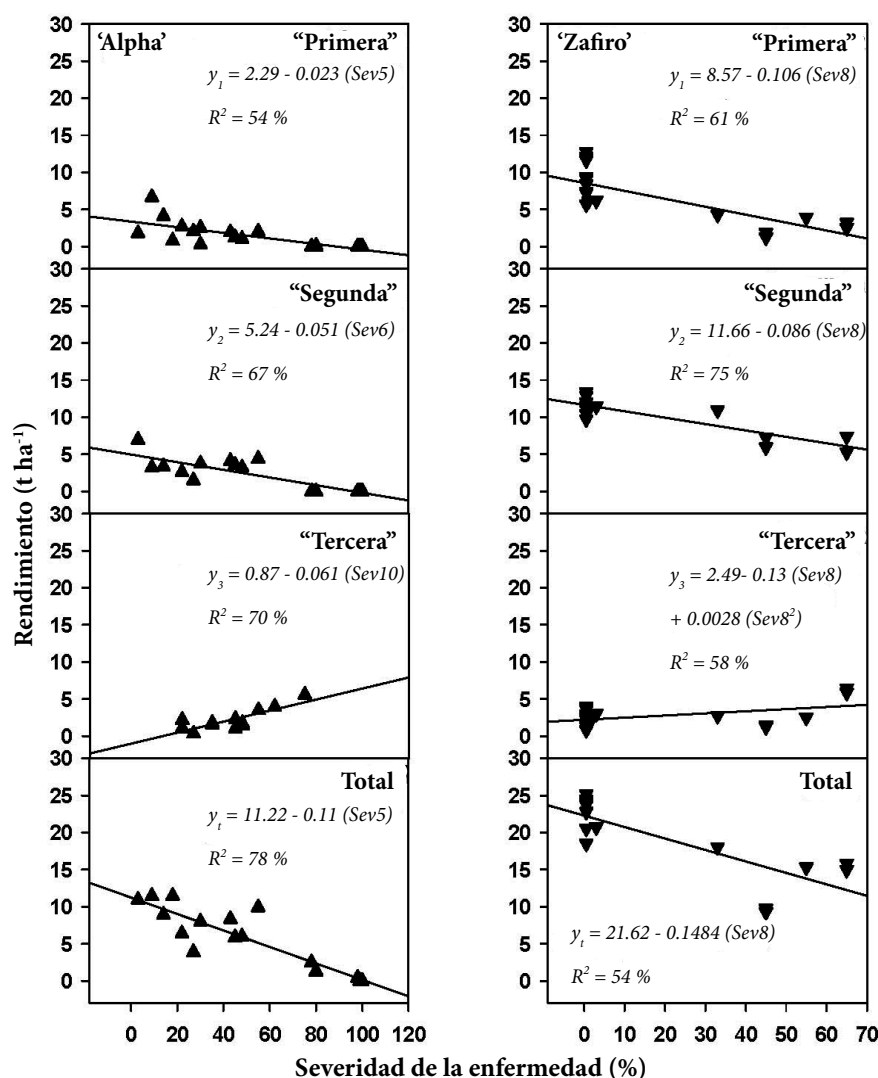


Figura 4. Relación entre el porcentaje de severidad de tizón tardío y el rendimiento de dos cultivares de papa por categoría comercial (“primera”, “segunda”, “tercera”, y total). Los parámetros se calcularon por medio de un análisis de regresión lineal. El porcentaje de severidad fue el acumulado a los 58 d (Sev5), 65 d (Sev6), 80 d (Sev8) y 94 d (Sev10) después de la siembra. El promedio de severidad final en ‘Alpha’ fue 67 % y de 29 % en ‘Zafiro’. Todos los parámetros fueron significativos ($P < 0.05$).

con base en el intercepto del modelo, ni en rendimiento predicho. La pendiente de los modelos de rendimiento de “tercera” en función de severidad fue positiva, a diferencia de los demás modelos (Figura 4), y conforme la severidad se incrementó, el rendimiento de esa categoría fue mayor, debido a que los tubérculos con potencial a ser “primera” o “segunda” no desarrollaron debido a la enfermedad (Figuras 2 y 3).

DISCUSIÓN

La relación cuantitativa entre la severidad del tizón tardío y el rendimiento de dos cultivares de papa estuvo descrita por modelos de regresión lineal, generados a partir de la severidad de la enfermedad acumulada, medida a los 58, 65 y 94 dds en el cv. ‘Alpha’ y a los 80 dds en ‘Zafiro’. La fecha de la severidad de la enfermedad utilizada en los modelos aplicados a ‘Alpha’ fue muy cercana a la época de inicio de tuberización, la cual se presentó a los 50-55 dds,

y en cultivares moderadamente resistentes como 'Zafiro' se presentó una semana o 10 días después que en 'Alpha'.

Se considera al inicio de la tuberización como uno de los sucesos más importantes en el ciclo de crecimiento de la papa (Sands *et al.*, 1979; Kooman y Haverkort, 1995; Morales-Fernández *et al.*, 2011); sin embargo, es necesario considerar otros eventos que ocurren a lo largo del periodo de crecimiento del cultivo, con excepción de la floración porque no tiene efecto sobre la tuberización (Sands *et al.*, 1979). Por ejemplo, los resultados indican que es importante dividir el crecimiento del cultivo en dos periodos, marcados principalmente por el inicio de la tuberización. Uno es el tiempo que transcurre desde la emergencia hasta el inicio de tuberización y el otro es del inicio de tuberización hasta el quemado de follaje. Se postula que las repercusiones de cada periodo son diferentes.

La importancia del primer lapso recae en la formación de tubérculos. Si ese periodo se mantiene libre del oomicete se inducirá la formación de tantos tubérculos como la genética de la planta pueda expresar bajo condiciones específicas de manejo; el desarrollo de esos pequeños tubérculos dependerá de los sucesos que ocurran en el segundo periodo. El cv. 'Alpha' sin aplicación de fungicida presentó un porcentaje de severidad acumulado superior a 80 % al inicio de tuberización, y el rendimiento respectivo fue sólo de tubérculos menores de 3 cm (Figuras 2 y 3), lo que implica que hubo formación de tubérculos pero la ausencia de follaje fisiológicamente activo posterior al inicio de tuberización no permitió su desarrollo.

Waggoner y Berger (1987) mostraron la importancia de la duración del follaje fisiológicamente activo en la producción de tubérculos de papa. Inclusive severidades de la enfermedad en el rango de 90 y 100 % al inicio de tuberización permitieron la formación de tubérculos en este estudio. En 2003 el inicio de la epifitía fue una semana más temprano que en 2002 y el rendimiento fue menor en 2003 (Cuadro 1). En ambos años y en todas las dosis de fungicidas hubo rendimiento en la categoría comercial "tercera" que corresponde a tubérculos menores de 3 cm, aun cuando en algunos tratamientos había casi 100 % de severidad al inicio de la tuberización.

En estudios realizados en el Valle de Toluca con diversos fungicidas y que incluyeron al cv. 'Alpha' sin aplicación de productos químicos, hubo producción de tubérculos (Grünwald *et al.*, 2000; Lozoya-Saldaña y Hernández-Vilchis, 2001; Romero-Montes *et al.*, 2003), aunque se sabe que el tizón tardío destruye a este cultivar durante el primer periodo de crecimiento de la papa en ese valle.

La importancia del periodo post inicio de tuberización

recae en el rendimiento total, pero principalmente en la calidad comercial de los tubérculos; es decir, el grado de severidad de la enfermedad en ese periodo influye en el crecimiento de los mismos. El cv. 'Zafiro' sin fungicida presentó un porcentaje de severidad acumulado durante el primer periodo inferior a 30 %, mientras que en el segundo periodo acumuló casi 100 %, lo que repercutió en una disminución de la calidad del rendimiento (Figuras 2 y 3), sobretodo en "primera", pues aumentó su rendimiento de "segunda" y mucho más el de "tercera".

Los modelos de regresión del rendimiento de cada categoría comercial en función de la severidad evidenciaron que el modelo correspondiente a "tercera" tuvo una pendiente positiva a diferencia de los demás modelos (Figura 4), lo que implica que conforme se incrementa la severidad de la enfermedad se incrementa también el rendimiento de esa categoría comercial. Existe la formación de tubérculos pero la enfermedad impide que se desarrollen por lo que al final terminan con un tamaño menor a 3 cm.

Ambos periodos están muy relacionados; sin embargo, puede ser que el primero sea más importante. Al respecto, el progreso de las epidemias de ambos cultivares fueron diferentes. El cv. 'Zafiro', moderadamente resistente a tizón tardío, presentó epidemias de lento progreso y de baja intensidad durante el primer periodo de crecimiento, pero un poco más severas durante el segundo periodo (Figuras 2 y 3).

Las pérdidas en porcentaje fueron menores en el cv. 'Zafiro' que en 'Alpha', susceptible a la enfermedad (Cuadro 3) y estuvieron asociadas con la severidad de la enfermedad acumulada al segundo periodo de crecimiento de la papa. Generalmente en el Valle de Toluca las infecciones tempranas son muy severas, y algunas inician inmediatamente después de la emergencia de plantas (Grünwald *et al.*, 2000, 2002). Dado que el progreso de la epifitía es muy rápido, las plantas pequeñas son más susceptibles a ser completamente destruidas, en comparación con las plantas adultas. Se ha observado que cuando el inicio de la epifitía ocurre en el segundo periodo de crecimiento, la severidad de la enfermedad final no supera a 15 % en un cultivar susceptible al que se le aplican productos químicos. Si la infección inicia en el primer periodo de un cultivar resistente en las mismas condiciones, se alcanza una severidad final de hasta 35 % lo que disminuye considerablemente el rendimiento (Lozoya-Saldaña y Hernández-Vilchis, 2001).

En trabajos previos se encontró que no es viable utilizar modelos de punto crítico en este patosistema (James *et al.*, 1972; Waggoner y Berger, 1987; Shtienberg *et al.*, 1990); sin embargo, este trabajo demuestra lo contrario. Es necesario considerar el inicio de tuberización como un punto crítico

del crecimiento de la papa para determinar pérdidas en rendimiento. No obstante, modelos construidos con variables integrativas, *i.e.*, área bajo la curva, podrían explorarse para incluir la porción de la curva de epidemia que afecta el inicio de tuberización y el que afecta la calidad.

Los modelos de estimación de pérdidas generados en este estudio son versátiles y fáciles de implementar, en contraste con los modelos propuestos por Waggoner y Berger (1987) que requieren medir el índice de área foliar. Sin embargo, los modelos descritos en este trabajo se construyeron con base en las condiciones del Valle de Toluca, por lo que sería necesario evaluar su viabilidad en otra región.

Pueden concebirse diversas estrategias de manejo a partir del conocimiento generado en este estudio, al identificar que el periodo de mayor impacto en el rendimiento total y en la calidad de los tubérculos es cuando el inicio de la epifitía ocurre en el período previo al inicio de tuberización. Con este fundamento de deben realizar prácticas culturales y de manejo dirigidas a retrasar el inicio de la epifitía y las tasas multiplicativas del patógeno, mediante la combinación de diversos factores como fungicidas y resistencia del hospedante.

CONCLUSIONES

Hubo efecto directo del grado de la epifitía con la reducción del rendimiento. Es necesario considerar al inicio de tuberización como punto crítico. El periodo previo es el más importante para reducir pérdidas, por lo que el manejo deberá encaminarse a retrasar el inicio de las epidemias en esa etapa y de su intensidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Bauske E M, S M Bissonette, A D Hewings (1997) Yield loss assessment of barley yellow dwarf disease on spring oat in Illinois. *Plant Dis.* 81:485-488.
- Fry W E (1977) Integrated control of potato late blight-effects of polygenic resistance and techniques of timing fungicide applications. *Phytopathology* 67:415-420.
- Fry W E, S B Goodwin (1997a) Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States. *Plant Dis.* 81:1349-1357.
- Fry W E, S B Goodwin (1997b) Resurgence of the Irish potato famine fungus. *Bioscience* 47:363-371.
- Grünwald N J, O A Rubio-Covarrubias, W E Fry (2000) Potato late blight management in the Toluca Valley: Forecast and resistant cultivars. *Plant Dis.* 84:410-416.
- Grünwald N J, G Romero-Montes, H Lozoya-Saldaña, O A Rubio-Covarrubias, W E Fry (2002) Potato late blight management in the Toluca Valley: Field validation of SimCast modified for cultivars with high field resistance. *Plant Dis.* 86:1163-1168.
- Grünwald N J, A K Sturbaum, G Romero-Montes, E Garay-Serrano, H Lozoya-Saldaña, W E Fry (2006) Selection for fungicide resistance within a growing season in field populations of *Phytophthora infestans* at the center of origin. *Phytopathology* 96:1397-1403.
- Guenther J F, K C Michael, P Nolte (2001) The economic impact of potato late blight on US growers. *Potato Res.* 44:121-125.
- James W C (1974) Assessment of Plant Diseases and Losses. *Annu. Rev. Phytopathol.* 12:27-48.
- James W C, L C Callbeck, W A Hodgson, C S Shih (1971) Evaluation of a method used to estimate loss in yield of potatoes caused by late blight. *Phytopathology* 61:1471-1476.
- James W C, C S Shih, W A Hodgson, L C Callbeck (1972) The quantitative relationship between late blight of potatoes and loss in tuber yield. *Phytopathology* 62:92-96.
- Johnson D A, T F Cummings, P B Hamn, R C Rowe, J S Miller, R E Thornton, G Q Pelter, E J Sorensen (1997) Potato late blight in the Columbia Basin: an economic analysis of the 1995 epidemic. *Plant Dis.* 81:103-106.
- Kooman P L, A J Haverkort (1995) Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: *Potato Ecology and Modeling of Crops Under Conditions Limiting Growth*. A J Haverkort, D K L Mackerron (eds). Kluwer Academia Publishers, Dordrecht Netherlands. pp: 41-59.
- Lozoya-Saldaña H, A Hernández-Vilchis (2001) Registered and section 18 compounds for control of late blight (*Phytophthora infestans* Mont. De By) in potatoes in Toluca, Mexico. *Agrociencia* 35:451-458.
- Madden L V, S P Pennypacker, C E Antle, C H Kingsolver (1981) A loss model for crops. *Phytopathology* 71:685-689.
- McKirdy S J, R A Jones, F W Nutter Jr (2002) Quantification of yield losses caused by Barley yellow dwarf virus in wheat and oats. *Plant Dis.* 86:769-773.
- Miller S A, F D Beed, C L Harmon (2009) Plant disease diagnostic capabilities and networks. *Annu. Rev. Phytopathol.* 47:15-38.
- Morales-Fernández S D, R Mora-Aguilar, J E Rodríguez-Pérez, Y Salinas-Moreno, M T Colinas-León, H Lozoya-Saldaña (2011) Desarrollo y rendimiento de papa en respuesta a la siembra de semilla-tubérculo inmadura. *Rev. Chapingo S. Hort.* 17:67-75.
- Nutter F W Jr, P S Teng, M H Royer (1993) Terms and concepts for yield, crop loss, and disease thresholds. *Plant Dis.* 77:211-215.
- Romero-Montes G, H Lozoya-Saldaña, A Hernández-Vilchis (2003) Adaptación por resistencia al tizón tardío (*Phytophthora infestans* Mont. De By) de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Toluca, México. *Rev. Chapingo S. Hort.* 9:193-208.
- Rubio-Covarrubias O A, A Rivera-Peña, J A Rangel-González, M Cadena-Hinojosa, R Flores-López, R Rocha-Rodríguez, J V Magallanes-González, C Ortiz-Trejo, C Díaz-Hernández, H López-Delgado, T E Zavala-Quintana, M Díaz-Valasis, A Paredes-Tenorio (2000) Manual para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Centro, Zinacantepec, Edo. de México, México. 80 p.
- Sands P J, C Hackett, H A Nix (1979) A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I. Derivation from well-managed field crops. *Field Crops Res.* 2:309-331.
- Savary S, P S Teng, L Willocquet, F W Nutter (2006) Quantification and modeling of Crop Losses: A Review of Purposes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44:89-112.
- Shtienberg D, S N Bergeron, A G Nicholson, W E Fry, E E Ewing (1990) Development and evaluation of a general model for yield loss assessment in potatoes. *Phytopathology* 80:466-472.
- Waggoner P E, R D Berger (1987) Defoliation, disease, and growth. *Phytopathology* 77:393-398.