

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Gestión

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

Efecto del incremento de la temperatura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos para el control de epidemias del tizón tardío (*Phytophthora infestans*) de la papa (*Solanum tuberosum*)

Un enfoque de adaptación al cambio climático en los trópicos de altura desde la simulación

Jaime Arturo Taipe Pumasunta

Tutor: Francisco Xavier Cuesta Camacho

Quito, 2022

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional		
	Reconocimiento de créditos de la obra	
	No comercial	
	Sin obras derivadas	
Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia		

Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Jaime Arturo Taipe Pumasunta, autor de la tesis Intitulada “Efecto del incremento de la temperatura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos para el control de epidemias del tizón tardío (*Phytophthora infestans*) de la papa (*Solanum tuberosum*). Un enfoque de adaptación al cambio climático en los trópicos de altura desde la simulación”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

25 de octubre de 2022

Firma: _____

Resumen

Las variaciones climáticas producidas por el calentamiento global, afectan a los ecosistemas agrícolas causando efectos negativos como: incremento de plagas y enfermedades, mayor ocurrencia de sequías y heladas y reducción de la productividad. La papa es un alimento clave, de gran parte de ecuatorianos, y su cultivo genera medios de vida para múltiples actores de su cadena agroalimentaria. Su principal amenaza biótica es el tizón tardío, que es controlado, principalmente, con el uso de fungicidas. El IPCC pronostica un calentamiento atmosférico de 1.8 °C que incrementaría las pérdidas económicas y la inseguridad alimentaria. El objetivo de esta investigación fue contrastar el desempeño de fungicidas sistémicos, como dimetomorph, fosfito de K y cimoxanil, aplicados a la variedad superchola con intervalos de 7, 14 y 21 días bajo la influencia de un aumento de temperatura. La metodología (experimental-cuantitativa) realizada consistió en instalar sendos experimentos en agro-climas similares, pero a diferentes altitudes así, 3050 msnm (temperatura actual de 12 °C) y de 2700 msnm (temperatura futura pronosticada de 14 °C); en estos se registró la temperatura, la humedad relativa y la precipitación; además se evaluó la tasa aparente de infección (r) y la severidad relativa (ABEDER); finalmente, se simuló las epidemias observadas con el simulador LB2004. Los resultados obtenidos muestran que a 3050 msnm dimetomorph cada 7 días retrasó el tizón tardío hasta 65 días; a 2700 msnm este retraso disminuyó un 66 % por lo que la tasa aparente de infección y la severidad aumentaron 2.7 y 5 veces, respectivamente. Se concluye que un clima más cálido y más horas de hoja húmeda, a 2700 msnm, optimizaron la infección, el establecimiento y el desarrollo de epidemias de tizón tardío. La elevación de la temperatura plantea varios escenarios: actuales fungicidas poco eficientes pasarían a ser inútiles, fungicidas cuya eficiencia actual se reduciría pero que seguirían siendo herramientas válidas y, fungicidas eficientes, hoy en día, que perderían toda eficacia bajo condiciones más cálidas. Dilucidar el efecto del calentamiento global requerirá profundizar aspectos como cambios fisiológicos del hospedero, adaptación evolutiva del patógeno (resistencia o sensibilidad al calor, fungicidas y su interacción) y el diseño de estrategias de manejo que controlen las intensas epidemias futuras.

Palabras clave: calentamiento global, tizón tardío de la papa, fungicidas sistémicos, agricultura andina, adaptación al cambio climático

A la Emilia, el Nico y Lola, su amor, acompañamiento y ayuda han sido fundamentales; me han impulsado a llegar. Aquí estoy!!!!

Mis agradecimientos al Bob, Mau, Freddy y Rafa, mis queridos hermanos, por su apoyo incondicional y desinteresado. Ha sido grandioso sentirles en cada momento de este proceso.

Tabla de contenidos

Figuras y tablas.....	15
Introducción.....	17
Capítulo primero Problemática, objetivos y marco conceptual.....	19
1. Problemática	19
1.1 Problemática del cambio climático para la productividad agrícola andina	19
1.2 Problemática del cambio climático para el tizón tardío de la papa	19
1.3 Problemática del control químico del tizón tardío de la papa	20
1.4 La adaptación climática en la lucha contra el tizón tardío de la papa	22
2. Objetivos.....	24
3. Marco conceptual	24
3.1 Cambio climático y su impacto en la agricultura de los Andes y del Ecuador	24
3.2 El tizón tardío: epidemiología y factores de influencia	26
3.3 Simulación del tizón tardío de la papa.....	29
Capítulo segundo Materiales y métodos.....	31
1. Fase de campo	31
1.1 Ubicación y factores en estudio.....	31
1.1 Diseño experimental	32
1.2 Unidad experimental.....	33
1.3 Variables.....	33
1.3.1. Clima	33
1.3.2. Tasa aparente de infección (r)	34
1.3.3. Severidad del tizón tardío	34
1.3.4. Emergencia	35
1.3.5. Inicio de la enfermedad	35
2. Fase de gabinete.....	35
2.1 Preparación de bases de datos climática y de severidad.....	35
2.2 Análisis estadístico y funcional	35
2.3 Simulación.....	36
2.4 Desempeño del Modelo	36
2.5 Métodos específicos de manejo de los experimentos de campo	37
2.1 Métodos específicos en la fase de gabinete	38

Capítulo tercero Resultados.....	43
1. Clima y epidemias en los sitios experimentales	43
1.1 Epidemias naturales.....	44
1.2 Epidemias con fungicidas.....	46
2. Efecto de la altura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos.....	47
2.1 Tasa aparente de infección TAI (r) y severidad (ABEDER) del tizón tardío.....	47
3. Simulación de epidemias de tizón tardío de la papa.....	53
Capítulo cuarto Discusión	55
1. Clima y epidemias en los sitios experimentales	55
1.1 Epidemias naturales.....	55
1.2 Epidemias con fungicidas.....	56
2. Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos.....	57
3. Simulación de epidemias de tizón tardío de la papa.....	64
4. Cambio climático y eficiencia de fungicidas.....	65
Conclusiones.....	69
Lista de referencias.....	71
Anexos.....	87
Anexo 1. Características químicas y de efectividad de los fungicidas evaluados.....	87
Anexo 2. Ciclo de vida de <i>Phytophthora infestans</i> y requerimientos de temperatura de eventos epidemiológicos.....	88
Anexo 3. Enfermedad policíclica: monociclos consecutivos (a), fases (b), incremento hipotético de área foliar con tizón (c), desarrollo de la epidemia en periodos favorables y desfavorables (d) y efecto del inicio de la epidemia y de la tasa de aparente de infección (e).....	89
Anexo 4. Esquema general del experimento en cada altura.....	90
Anexo 5. Clave de escala de daño foliar por tizón tardío de la papa.....	91
Anexo 6. Modificaciones al sub-modelo fungicidas	92
Anexo 7. Estadísticos de agentes meteorológicos durante el experimento	93
Anexo 8. Curvas de progreso de la epidemia de tizón tardío naturales y con aplicaciones de dimetomorph, fosfito de K y cimoxanil cada 7, 14 y 21 días a 3050 y 2700 msnm.	94
Anexo 9. Promedios de TAI (r) de tratamientos	95
Anexo 10. Análisis de efectos simples de la TAI (r).....	96
Anexo 11. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) y DMS (5 %) de intervalos de aplicación	97

Anexo 12. Análisis de efectos simples-simples de la severidad relativa (ABEDER)....	98
Anexo 13. Promedios de severidad relativa (ABEDER) y rangos DMS (5 %) de las interacciones de factores.....	99
Anexo 14. Promedios de la severidad relativa (ABEDER) y rangos DMS (5 %) de contrastes ortogonales de interés	100
Anexo 15. Curvas de progreso de epidemias de tizón tardío, simulada (azul) y observada (rojo), de fungicidas sistémicos e intervalos de aplicación a 12 °C	101
Anexo 16. Curvas de progreso de epidemias de tizón tardío, simulada (azul) y observada (rojo), de fungicidas sistémicos e intervalos de aplicación a 14 °C	102
Anexo 17. Pruebas de intervalo de confianza y de sobre de aceptación (PSA) para la severidad observada y simulada de fungicidas sistémicos aplicados a varios intervalos a 12 °C y 14 °C.....	103
Anexo 18. Desempeño del simulador LB2004 con fungicidas sistémicos aplicados a varios intervalos a 12 °C y 14 °C	104

Figuras y tablas

Figura 1. Comportamiento de los agentes climáticos registrados durante la fase experimental de campo a 3050 msnm (1) y 2700 msnm (2).	43
Figura 2. Tendencia y amplitud del microclima en 4 segmentos del día a 3050 msnm (1) y 2700 msnm (2).....	45
Figura 3. Acumulación diaria de las horas de humedad de la hoja a 3050 msnm y 2700 msnm	45
Figura 4. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) de intervalos diferenciados por fungicida. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 8 repeticiones.....	49
Figura 5. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) de fungicidas diferenciados por intervalos. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 8 repeticiones.....	50
Figura 6. Promedios de severidad relativa (ABEDER) y rangos de Tukey (5 %) de tratamientos. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 4 repeticiones. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas.....	50
Figura 7. Efecto cuadrático sobre la TAI (r) y la severidad (ABEDER) del tizón tardío de la papa del factor intervalos de aplicación de fungicidas sistémicos	53
Tabla 1 Principales características agro-ecológicas de los sitios experimentales	32
Tabla 2 Factores, niveles, tratamientos e interacciones del experimento general.....	33
Tabla 3 ADEVA para la TAI (r) y la severidad (ABEDER) en el experimento del efecto de la altitud sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos en el control de epidemias de tizón tardío de la papa.....	48

Introducción

Los Andes han dado origen a varios alimentos de la humanidad (p. ej. amaranto, chocho, quinoa) (King 1987, 44; Sayre, Stenner, y Argumedo 2017, 100). La papa (*Solanum tuberosum*), claro ejemplo de lo mencionado (Spoonner et al. 2005; Litaladio y Castaldi 2009), es actualmente el tercer cultivo alimenticio de mayor importancia a nivel global (United Nations, Centro Internacional De La Papa, y FAO 2009); la FAO menciona que se producen cerca de 400 millones de t año⁻¹ (FAOSTAT 2017; FAO 2016) y más de mil millones de personas comen papa alrededor del mundo (Devaux, Kromann, y Ortiz 2014, 185). En Ecuador, existen alrededor de 90.000 productores de papa que la comercializan para alimentar a los pobladores de la Sierra ecuatoriana principalmente (Kromann et al. 2011, 581); unas 375.000 personas dependen de este tubérculo para su subsistencia (Reinoso 2013).

El tizón tardío (*Phytophthora infestans*) es la mayor limitante biótica para el cultivo de papa alrededor del mundo (Kromann et al. 2014, 245; Harrison 1992, 385; Ristaino 2002) y en el Ecuador (Crissman, Cole, y Carpio 1994, 593). Esta enfermedad ataca hojas, tallos y tubérculos causando manchas húmedas irregulares que se necrosan destruyendo el tejido; se presenta en cualquier momento desde la preemergencia hasta la senescencia del cultivo; un clima moderadamente frío y húmedo multiplica sus propágulos diseminándolos hacia tejido sano; es capaz de colapsar la totalidad de un campo rápidamente (Agrios 2005, 422; Henfling 1987, 6). Mundialmente, ocasiona pérdidas de 12 billones USD/año⁻¹ (Shailbala y Kumar 2017, 821). Pese a su importancia, Ecuador no reporta cifras oficiales de pérdidas (Crissman, Cole, y Carpio 1994, 593).

La aplicación de fungicidas es la principal herramienta de control (Kromann 2012, 1008). Los fungicidas cimoxanil y dimetomorph son ampliamente utilizados para el control del tizón tardío en Ecuador (Unda et al. 2013), mientras el fosfito de potasio (de bajo impacto ambiental) es una alternativa viable al mancozeb. Estos fungicidas sistémicos poseen actividad anti-esporulante, actúan sobre el crecimiento micelial y muestran ligera acción curativa. Son ligeramente tóxicos y se los comercializa en concentraciones bajas (Kromann et al. 2012).

La sostenibilidad de la agricultura andina enfrenta amenazas como problemas fitosanitarios emergentes (Barzman et al. 2015, 2) y aplicación de pesticidas menos efectivas debido al cambio climático (Fones et al. 2020). Esto se palparía en la reducción

de rendimientos del cultivo de papa que, a su vez, aumentaría la vulnerabilidad y riesgos económicos de pobladores rurales andinos (Sanabria y Lhomme 2013, 693). Medidas de adaptación para estas amenazas (actualmente no existen) deben ser amplias para garantizar su efectividad (Heeb, Jenner, y Cock 2019, 956).

La presente investigación propuso como objetivo general, estudiar el desempeño de tres fungicidas sistémicos, para el control del tizón tardío de la papa, a 3050 msnm y 2700 msnm, midiendo la tasa de infección aparente y la severidad de epidemias evaluadas en parcelas rociadas, a diferentes intervalos, con cada uno de ellos. De esta manera se investiga la influencia de un incremento de temperatura de aire, en el desarrollo de epidemias que son simuladas posteriormente.

Esta investigación contiene cuatro capítulos, el primero tiene que ver con el análisis de problemáticas del cambio climático para el cultivo de papa, el tizón tardío y los fungicidas; profundizará con el marco teórico sobre el clima favorable para la biología de *Phytophthora infestans*, la epidemia de tizón tardío, el cultivo de la papa y los fungicidas, importantes particularidades de la epidemia en Ecuador, la adaptación clave para alcanzar la resiliencia y finaliza con la simulación. En el capítulo dos se expone el área de estudio, la metodología seguida para la implantación de los experimentos, las variables evaluadas, la estimación de la tasa aparente de infección y severidad, la segmentación diaria del clima y la parametrización del simulador utilizada. En el capítulo tres se reporta la influencia del clima sobre epidemias naturales y con fungicidas en cada sitio experimental, el efecto de la altura sobre la eficiencia de los fungicidas a través del análisis de la tasa aparente de infección y la severidad y la simulación realizada. En el cuarto capítulo se presentan las discusiones principalmente sobre la influencia del clima y particularizando en la temperatura del aire. Finalmente se presentan conclusiones sobre el desempeño de los fungicidas y el efecto de la temperatura.

Capítulo primero

Problemática, objetivos y marco conceptual

1. Problemática

1.1 Problemática del cambio climático para la productividad agrícola andina

Algunos indicadores como el retroceso acelerado de los glaciares (Vuille et al. 2018, 2) y las anomalías en los patrones de precipitación observados en los Andes (Heikkinen 2017, 77) demuestran que el clima está cambiando rápida y profundamente. El cambio global¹ plantea desafíos ambientales para la humanidad en el presente siglo (Jovovic, Micev, y Velimirovic 2016, 47; Burdon y Zhan 2020, 1; Malhi et al. 2020, 2). La reducción de superficie cultivable (Tito, Vasconcelos, y Feeley 2018, 601) y la escasez de agua para riego agrícola y consumo humano, observadas en los Andes, confirman las inciertas amenazas del cambio climático.

Las nuevas condiciones climáticas, (temperaturas más altas, patrones de precipitación erráticos y sus combinaciones) disminuirán la productividad agrícola, de forma directa, al afectar el desarrollo y los rendimientos, y de forma indirecta, al influir en los ataques de enfermedades de los cultivos (Newbery, Qi, y Fitt 2016, 101; Garrett et al. 2013, 72). Las elevadas temperaturas del aire redujeron la producción de papa entre un 87 % y 97 %, equivalentes a pérdidas económicas de 805 a 2304 USD ha⁻¹ año⁻¹ (Tito, Vasconcelos, y Feeley 2018, 599). En el Ecuador, el área de producción de papa se ubica en la región andina (monocultivos, hospederos alternos, mayor infección) donde existe un gran riesgo de problemas fitosanitarios (Garrett et al. 2013, 72).

1.2 Problemática del cambio climático para el tizón tardío de la papa

En Ecuador, la población de *Phytophthora infestans*, agente causal del tizón tardío de la papa, es clonal y la enfermedad endémica² (Kromann 2007, 12). La mayoría de

¹ **Cambio global:** Abarca todos los cambios del clima, la tierra, los océanos, la composición y química de la atmósfera y los sistemas ecológicos que influyen en el medio-ambiente global (Chakraborty et al. 2008).

² La acepción de **endemismo**, relacionada a la epidemiología se refiere a que se presentan epidemias con extrema frecuencia (Arneson 2011).

campos están rodeados por varias fuentes de inóculo durante todo el periodo vegetativo ya que el patógeno es ubicuo (Oyarzún, Taípe, y Forbes 2001, 16; Adler et al. 2004, 156) por lo tanto, la infección es intensa (Kromann 2007, 24). Durante el 2019 el 49 % de productores de papa ecuatorianos lo reportaron como la enfermedad más importante (Coronel 2020, 8). Es capaz de reducir entre 30 % y 75 % del rendimiento en variedades susceptibles cultivadas en sitios muy húmedos (Agrios 2005, 426; Olanya et al. 2001, 185). En países en desarrollo ocasiona un 15 % de pérdidas del rendimiento (Global Initiative on Late Blight (GILB) y International Potato Center (CIP) 2014). Mundialmente, sus daños ascienden a los 12 billones USD/año⁻¹ (Shailbala y Kumar 2017, 821). En Ecuador, no existen cifras oficiales de pérdidas económicas por el tizón tardío (Crissman, Cole, y Carpio 1994, 593), no obstante, se gasta entre 200 a 600 USD ha⁻¹ en fungicidas para su control (Ortiz y Forbes 2003, 54).

El cambio climático adicionará incertidumbre a las variables ambientales y biológicas que se involucran e interactúan para definir la epidemia de tizón tardío (Andrade-Piedra, Hijmans, Forbes, et al. 2005, 1197; Shtienberg et al. 1989, 591; Shakya et al. 2015, 234), las cuales posiblemente se exacerben. Adicionalmente, influirá en el desempeño de métodos de control establecido (p. ej. aplicación de fungicidas) (Mayton et al. 2001, 1010; Wu et al. 2020, 769), aunque, la dirección de esta influencia es incierta y aún no se ha investigado a fondo (Delcour, Spanoghe, y Uyttendaele 2015, 8; Juroszek y Tiedemann 2011, 106); es posible también la selección de poblaciones del patógeno con rápida adaptación térmica que tendrán protagonismo en la severidad y distribución del tizón tardío en años futuros (Yang et al. 2016, 4049; Mariette et al. 2016; Wu et al. 2020, 777).

Es urgente abarcar los vacíos de conocimiento reconocidos para los Andes, entre los que están: 1) la optimización del uso de los fungicidas (reducción de dosis y tasas por superficie), 2) mejorar el entendimiento del potencial de la simulación y de los factores que afectan la eficiencia de diferentes de herramientas de control de la enfermedad (Kromann 2007, 12), como requisito para la adaptación y mitigación climática.

1.3 Problemática del control químico del tizón tardío de la papa

En casi todas las partes donde el tizón tardío es un problema, la aplicación de fungicidas es el principal método de control (Ortiz y Forbes 2003, 48; Kromann et al. 2012, 1008; Hijmans et al. 2000, 4; Aylor et al. 2001, 1189); se usan fungicidas

protectantes³, sistémicos⁴, sus mezclas y alternado modos de acción⁵ (Lal, Yadav, y Singh 2017), con esquemas preventivos, como aplicarlos con intervalos de 7 a 14 días (Stein y Kirk 2002, 575), para garantizar el control; tres fungicidas (mancozeb, maneb y chorotalonil), muy usados contra el tizón tardío, se incluyeron en una lista de pesticidas peligrosos para los agricultores de los países en desarrollo (Wesseling, Corriols, y Bravo 2005, 699). Los fosfitos, considerados como bio-fungicidas por la US-EPA, han demostrado ser tan eficientes como el mancozeb (Kromann et al. 2012, 1008) y serían alternativas económicas y más saludables a los fungicidas ampliamente utilizados en los países en desarrollo (Forbes et al. 2007, 12).

Actualmente el tizón tardío es más severo en los países en desarrollo, como Ecuador, donde las condiciones climáticas, la persistencia del inóculo y la susceptibilidad de las variedades cultivadas, tornan difícil predecir el inicio y la severidad, dificultando su control (Forbes et al. 2007). Los agricultores desconocen varios aspectos del tizón tardío, por esta incertidumbre y para no correr riesgos (Carisse, McRoberts, y Brodeur 2008, 444) mezclan productos y elevan las dosis y frecuencias de aplicación, o sea, aplican fungicidas intensamente (hasta 20 aplicaciones por ciclo de cultivo), afectando su salud, el medioambiente (Forbes et al. 2007, 7) e incrementando el riesgo de pérdidas económicas (8-40 % de los costos de producción son fungicidas) (Kromann et al. 2014, 251; Crissman et al. 1998, 110). Varios estudios han reportado que los productores acceden fácilmente a los fungicidas (Oyarzún et al. 2005, 122) y no utilizan protección adecuada al aplicarlos (Eddleston et al. 2002, 1164; Nelson et al. 2001, 689; Wesseling, Corriols, y Bravo 2005, S699; Yanggen et al. 2004, 75). Las razones expuestas explican porque no se realiza un uso óptimo⁶ de esta herramienta (Kromann 2007, 32) resultando en un deficiente control químico del tizón tardío (Kromann 2007, 11).

Posiblemente, el cambio climático incrementará la severidad de las epidemias vegetales (Koli, Bhardwaj, y Mahawer 2019, 81; Matthiesen, Ahmad, y Robertson 2015, 589); además, como el desempeño de los pesticidas depende, en gran medida, de las

³ **Fungicidas protectantes:** son aquellos que se depositan sobre la superficie foliar y que interfieren los eventos pre - infección de los hongos (Schwinn y Margot 1991).

⁴ **Fungicidas sistémicos:** son aquellos que tienen capacidad de introducirse en el tejido foliar, algunos incluso alcanzan el sistema vascular y logran transportarse (Schwinn y Margot 1991).

⁵ **Modo de acción:** describe cómo el ingrediente activo del fungicida afecta (a nivel morfológico, de componentes celulares, procesos bioquímicos y sitios de actividad molecular) al hongo patógeno (Latin 2017).

⁶ **Uso óptimo:** es aplicar una cantidad suficiente para un control efectivo de la enfermedad y evitar aplicaciones sin un efecto notable. Está en función de las propiedades fungicidas de los productos utilizados, de las condiciones climáticas, de la presión de la enfermedad y de la resistencia de la variedad de papa (Kromann 2007, 32).

condiciones ambientales (Harrison 1995, 230; Matzrafi 2019, 10), también influiría negativamente en el control que proporcionan (Delcour, Spanoghe, y Uyttendaele 2015, 10). Alcanzar la eficiencia deseada permitiría prácticas conflictivas como el incremento de las dosis (Guy, Grau, y Oplinger 1989) y/o usar frecuentemente los pesticidas (Salinari et al. 2006, 1305; Juroszek y Tiedemann 2011, 107); estas prácticas elevarían el impacto medioambiental negativo (exposición, degradación y transporte) y desarrollo de resistencia (Chakraborty 2013, 1986) en ciertos casos (Juroszek y Tiedemann 2011, 101; Noyes et al. 2009).

Phytophthora infestans adelantaría el inicio de la epidemia y completaría más generaciones en temporadas más cálidas (Juroszek et al. 2020, 188; Elad y Pertot 2014, 102); estas epidemias extremadamente severas requerirán aplicaciones de fungicidas muy efectivas (Delcour, Spanoghe, y Uyttendaele 2015, 13). Por consiguiente, en un futuro clima más cálido, algunos fungicidas (mancozeb) deberán ser reemplazados por unos más eficientes y otros (azoxistrobin) podrían seguir utilizándose efectivamente, incluso en bajas frecuencias (Qin et al. 2016, 7).

Es evidente el rol de los fungicidas asegurando la producción de alimentos (Ghini et al. 2012, 5) aunque, para satisfacer las demandas de una población en aumento, su uso y el riesgo futuro también se incrementaría (Koli, Bhardwaj, y Mahawer 2019, 66; Qin et al. 2016, 1). Investigar para optimizar el uso de los fungicidas convencionales sería una de las mejores inversiones para lograr, a corto plazo, un impacto positivo en los agricultores de escasos recursos.

1.4 La adaptación climática en la lucha contra el tizón tardío de la papa

Si la papa representa una de la principales fuentes de alimento para el autoconsumo, comercio e ingresos de pobladores rurales y actualmente las enfermedades reducen un 16% de su rendimiento en cultivos no protegidos, se puede pensar que el cambio climático exacerbarían estas pérdidas (Forbes et al. 2007; Newbery, Qi, y Fitt 2016, 101; Matzrafi 2019, 10), y que su vulnerabilidad y riesgos económicos aumentarían (Sanabria y Lhomme 2013, 693).

Los múltiples efectos del cambio climático (patógenos invadiendo nuevas áreas y hospederos, cepas más agresivas o resistentes a fungicidas, decaimiento de la resistencia genética del hospedero, condiciones climáticas para epidemias más severas) (Qin et al. 2016; He et al. 2018; Burdon y Zhan 2020, 1), requieren de medidas de adaptación como

la resistencia y precocidad de los hospederos, mayor diversidad de especies y variedades, mejores prácticas de cultivo (fertilización enfocada al desarrollo saludable), control de las enfermedades e identificación de áreas vulnerables; además, una visión amplia que garantice su efectividad, p. ej., pretender manejar el tizón tardío con la sustitución de variedades, a pesar de ser una excelente medida de adaptación y mitigación (Nair 2019; Phillips et al. 2017; FAO 2015) es una estrategia conflictiva (por costosa y larga) tornándose poco práctica en los países en desarrollo (Forbes et al. 2007; Forbes 2012); por tanto, la necesidad de aumentar las aplicaciones de fungicidas por el calentamiento global es posible (Juroszek y Tiedemann 2011, 107).

En el caso del tizón tardío de la papa, investigaciones del CIP reportan que los productores ecuatorianos carecen de conocimientos y destrezas para realizar un apropiado control (Forbes et al. 2007, 7). La capacitación e incremento de capacidades de pequeños productores apoyaría la adaptación pues, comprendiendo los efectos del clima sobre la epidemia, harían un uso efectivo de fungicidas (Harrison 1992, 385) y minimizarían las pérdidas (Newbery, Qi, y Fitt 2016, 101). Generar conocimiento y fortalecer capacidades, por ende, será esencial (Nelson et al. 2001; Ortiz et al. 2004) para crear sistemas de cultivo resilientes (Barzman et al. 2015, 4), toma de decisiones óptima, y el desarrollo de estrategias de adaptación para enfrentar los potenciales impactos negativos del cambio climático asegurando la producción alimentaria del futuro (Raymundo et al. 2018, 1).

El desempeño de fungicidas para el control del tizón tardío de la papa, bajo diferentes alturas, se evaluó utilizando dos experimentos de campo sembrados a 2700 metros sobre el nivel del mar (en adelante msnm) (temperaturas del aire promedio de 12 °C) y 3050 msnm (temperaturas del aire promedio de 14 °C) ubicados dentro de una misma zona agroecológica (Tabla 1). Se sembró la variedad de papa superchola, se aplicó los fungicidas sistémicos cimoxanil, dimetomorph y fosfito de K (especificaciones en el Anexo 1) a intervalos de 7, 14 y 21 días. Se apreció la tasa de infección y la severidad del tizón tardío, se verificó la significancia estadística de la altitud (temperatura del aire, en adelante T), los fungicidas, los intervalos de aplicación y sus interacciones. Se simularon las epidemias con el simulador LB2004 modificado para la variedad superchola (Kromann et al. 2007); el sub - modelo de fungicidas, corrió incorporando modificaciones de estudios previos (Blandón-Díaz et al. 2011). Al final se contrastó las epidemias (observadas vs. simuladas) a 2700 msnm vs. 3050 msnm de cada tratamiento.

Esta investigación pretendió dilucidar si ¿La eficiencia de fungicidas sistémicos, para manejar el tizón tardío, difiere o no con la temperatura a la que se cultiva la papa y, si LB2004 es capaz de simular las epidemias observadas? .

2. Objetivos

Evaluar el efecto de la altitud (temperatura) sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos aplicados a diferentes intervalos de tiempo para el control del tizón tardío de la papa y utilizar LB2004 para simular las epidemias. Este estudio se enfocó en: a) Estudiar la influencia de la altitud sobre el desarrollo de epidemias de tizón tardío de la papa a 2700 msnm y 3050 msnm. b) Evaluar el efecto de la altitud sobre la eficiencia de intervalos de aplicación de 7, 14 y 21 días de los fungicidas sistémicos cimoxanil, dimetomorph y fosfito de K para el control del tizón tardío de la papa a 2700 msnm y 3050 msnm. c) Simular las epidemias observadas en los experimentos de campo.

3. Marco conceptual

3.1 Cambio climático y su impacto en la agricultura de los Andes y del Ecuador

El proceso de forzamiento radiativo efectivo⁷ (ERF por sus siglas en inglés) antropogénico (impulsado por emisiones de GEI y cambios en el uso del suelo), determina un incremento de la temperatura del aire (superior a su tendencia histórica natural, con velocidad inédita y constante década a década). Esta alteración es el calentamiento global (Myhre et al. 2013, 677), principal factor que desencadena e impulsa el cambio climático que afecta a los sistemas y comunidades (Viguera et al. 2017, 9). Los modelos globales de circulación general⁸ (en adelante GCM por sus siglas en inglés) proyectan la posible evolución del clima global en las próximas décadas (Paz et al. 2019, 11). Estos producen

⁷ **Forzamiento radiativo efectivo (ERF):** Cambio en el flujo radiativo descendente neto en la parte superior de la atmósfera, después de permitir que las temperaturas atmosféricas, vapor de agua, nubes y albedo del suelo se ajusten, pero con la temperatura superficial promedio global o las condiciones del océano y del hielo marino inalteradas (Myhre et al. 2013, 665).

⁸ **Modelos globales de circulación general (GCM):** Modelos que simulan los procesos físicos que determinan el clima de la tierra dividiendo sus componentes (atmósfera, hidrósfera, etc.) en celdas de aproximadamente 1 o 2 grados geográficos de lado y que aportan resultados con una resolución horizontal que generalmente supera los 100 km en latitudes medias (Paz et al. 2019, 11).

tendencias, aunque divergentes, de un incremento de la temperatura del aire de manera consistente (Buytaert, Cuesta, y Tobón 2011, 21) y pronostican que para el año 2100 la temperatura de aire en el planeta aumentará entre 1.8 °C, bajo el escenario de ruta representativa de concentración 4.5⁹ (en adelante RCP por sus siglas en inglés) y 4 °C, bajo el RCP 8.5¹⁰, según las regiones (IPCC 2018, 7).

La región andina tropical no ha estado exenta de las alteraciones climáticas como lo demuestran las variaciones de los últimos 80 años; esta región del Ecuador se ha calentado a una tasa decadal de +0.10 °C (en los Andes); las precipitaciones aumentaron, la humedad relativa también aumentó un 2.5 % por década (Vuille et al. 2008, 83; Malhi y Wright 2004, 311). Estas alteraciones continuaran los próximos años ya que se pronostican aumentos sistemáticos de la temperatura del aire que van de 4.5 a 5 °C, para fines del siglo 21, en escenarios de bajas y altas emisiones, respectivamente (Sanabria y Lhomme 2013, 688; Vuille et al. 2008, 91).

Respecto a las precipitaciones, se han pronosticado alteraciones erráticas, independientes de los RCP, disminuyendo en algunos lugares y aumentando en otros, posiblemente mucho más, a menor altura (Sanabria y Lhomme 2013, 683; Urrutia y Vuille 2009, 6). Para el caso específico del Ecuador, 20 GCM, bajo un escenario A1B, pronosticaron un clima futuro con un consistente aumento de la temperatura del aire de +0.72 a +1.12 °C. La precipitación exhibe proyecciones muy variables que van de -44.2 a +84 mm año⁻¹ (Buytaert, Céleri, y Timbe 2009, 2; Carvajal et al. 2019, 97) siendo Ecuador, Colombia y Perú, los países es los que se espera un incremento más notable de las precipitaciones (Paz et al. 2019, 14; Buytaert, Cuesta, y Tobón 2011, 25). Estudios más actuales corroboran este aumento general de la temperatura del aire (+4.4 °C) y la precipitación (+17 %) a fines del siglo 21 (Erazo 2020, 5).

El calentamiento atmosférico, pondrá de manifiesto condiciones más favorables para cultivar en zonas elevadas, resultando en una expansión de la frontera agrícola de alta montaña. Al final del siglo, la frontera agrícola¹¹ ascendería 500 metros en los Andes

⁹ **Ruta representativa de concentración 4.5 (RCP 4.5):** Las emisiones de GEI se moderarán a partir de la mitad del siglo estabilizando las concentraciones atmosféricas de CO₂eq² entre 500 y 600 ppm en las últimas décadas de siglo 21. Estas concentraciones incluyen además del CO₂ todos los GEI ponderados en función de su contribución al calentamiento global (Paz et al. 2019, 11).

¹⁰ **Ruta representativa de concentración 8.5 (RCP 8.5):** Continuo crecimiento de las emisiones de GEI a lo largo del siglo 21 alcanzando concentraciones de CO₂eq² de 1250 ppm al final. Estas concentraciones incluyen además del CO₂ todos los GEI ponderados en función de su contribución al calentamiento global (Paz et al. 2019, 12).

¹¹ **Frontera agrícola:** Es la división entre la zona afectada antrópicamente (tierras ocupadas con cultivos o ganado) y la zona sin intervención humana donde solo crece vegetación natural (Bustos-Cordero 2019, 19).

(C. Pérez et al. 2010, 74); esto ampliaría el potencial rango geográfico de muchos patógenos (Coakley, Scherm, y Chakraborty 1999; Hernández-Lambrano, González-Moreno, y Sánchez-Agudo 2018; Juroszek y Tiedemann 2013, 164). Adicionalmente, muchos hongos y bacterias patógenas se beneficiarán de los cambios en los patrones de precipitación (se crearían medioambientes prósperos para su supervivencia, multiplicación, etc.) e incrementarían sus ataques (Roos et al. 2011, 3) en zonas y épocas no habituales. Asimismo, la variabilidad climática incrementaría las poblaciones de patógenos y reduciría la confiabilidad de algunas estrategias de manejo de enfermedades (Barzman et al. 2015, 3).

Desafortunadamente, los pronósticos de temperatura del aire y precipitación proporcionados por los GCM tienen limitada utilidad para el manejo de enfermedades fungosas, pues epidemiológicamente son más importantes las predicciones de humedad de la superficie foliar y esto no es posible obtenerlo (Coakley, Scherm, y Chakraborty 1999, 418).

3.2 El tizón tardío: epidemiología y factores de influencia

Phytophthora infestans es un microorganismo del reino Cromista (Estramenófila) (Fry 2008, 385; Gupta y Thind 2018, 21; Agrios 2005, 391–92). Su ciclo de vida tiene dos fases: sexual (para su diversidad genética) y asexual, responsable del tizón tardío. La fase asexual es influenciada por factores climáticos, bióticos y los fungicidas (Koli, Bhardwaj, y Mahawer 2019, 78; Chakraborty, Tiedemann, y Teng 2000, 317). La influencia del clima alcanza aspectos de la biología asexual de *P. infestans* (germinación de esporas, crecimiento micelial, esporulación), la epidemiología del tizón tardío (dispersión de esporas, cantidad de inóculo, etc.), la dinámica temporal-espacial de los fungicidas (penetración, lavado, degradación) y la fisiología de la planta de papa (Anexo 2).

La extrema sensibilidad a pequeñas alteraciones del clima tiene importantes implicaciones sobre eventos del ciclo asexual (producción de esporangios, periodos de incubación y latencia cortos (en adelante PI¹² y PL¹³) etc.). Considerando la temperatura

¹² **Periodo de incubación (PI):** es el lapso de tiempo (en horas) transcurrido desde la inoculación hasta el apareamiento de los primeros síntomas (manchas necróticas) (Van Oijen 1991).

¹³ **Periodo de latencia (PL):** es el lapso de tiempo (en horas) transcurrido desde la inoculación hasta el apareamiento de los primeros signos (esporangios formados) (Van Oijen 1991).

del aire, la germinación de esporangios es directa (6 – 24 °C) o indirecta (12 -16 °C) (Crosier 1934; Judelson y Blanco 2005, 49). la esporulación ocurre entre 19 y 22 °C, el crecimiento micelial a 10 °C se cuadruplica a 20 °C (Hartill et al. 1990). Así también, la precipitación, llovizna, neblina y bruma mojan el follaje y acumulan agua libre en la superficie foliar, posibilitando la producción, germinación y supervivencia de esporangios y zoosporas; sobre tejido seco la infección es imposible; humedades relativas del 90 - 100 % permiten abundante esporulación (Harrison 1995, 222) La elevada radiación solar (UV especialmente) de las montañas andinas afecta de forma particular la supervivencia de los esporangios (Mizubuti, Aylor, y Fry 2000, 78).

La temperatura del aire también influye etapas del desarrollo del tizón tardío como la supervivencia de esporangios (Harrison 1992, 386–92; 1995, 220–22); a 15 °C, de 2 a 5 horas es suficiente para que la infección suceda (Harrison 1995, 220). La precipitación provoca la evaporación y junto a la transpiración incrementan la humedad adyacente al follaje, la esporulación y en consecuencia la densidad de inóculo; si llega a condensarse favorece la infección (Harrison 1992, 394; 1995, 222; Judelson y Blanco 2005, 50); es más determinante la distribución, antes que la intensidad, de la precipitación. El viento favorece (diseminando esporangios) y limita (secando las hojas) el tizón tardío. La radiación solar modifica el microclima, en consecuencia influencia la infección (Harrison 1992, 400–402; 1995, 225).

Las interacción entre temperatura del aire y humedad relativa, más preponderante para el tizón tardío que separadamente, define la duración de la humedad de la hoja, esencial para la infección (Crosier 1934). Por tanto, se asocia las epidemias de tizón tardío con condiciones húmedas y temperaturas del aire moderadas (Rivera et al. 2014, 1; Fry 2008, 386; Harrison 1992, 385; 1995, 215). La amplitud diurna de la temperatura del aire (Shakya et al. 2015, 235) juega un papel relevante determinando una serie de eventos epidemiológicos que definirán la intensidad de la epidemia: TE, infección directa o indirecta, tasa de crecimiento de las lesiones (en adelante TCL¹⁴), óptimo crecimiento del patógeno dentro del hospedero, duración de ciclo de vida del patógeno etc. (Rivera et al. 2014, 4). La concentración del inóculo tiene una periodicidad diurna cuyo máximo es al final de la mañana y junto a la idoneidad de las condiciones para la infección influirá en el número de nuevas lesiones (Harrison 1995, 230). Evidentemente el desarrollo del tizón

¹⁴ **Tasa de crecimiento de la lesión (TCL):** es la medida de crecimiento de la lesión durante un periodo determinado (Van Oijen 1991).

tardío depende, en gran medida, del clima y es un proceso dinámico (Harrison 1992, 400–402; 1995, 225).

Sin restricciones, el tizón tardío describe la característica curva sigmoidea de las enfermedades policíclicas (Agrios 2005, 274). Curvas generalmente constantes y aplanadas, representan algún factor, o combinación, que limitan el desarrollo de la epidemia. Estudiándola, gráficamente y a través de la tasa aparente de infección (velocidad de progreso) y la severidad (cantidad de enfermedad) (Harrison 1995, 217; López 2000), se aprecia la cantidad y eficiencia del inóculo inicial, se conoce si la infección fue temprana o tardía, los efectos del clima, de la resistencia varietal o de estrategias de manejo (aplicación de fungicidas) (Anexo 3: d, e) en su desarrollo lento o rápido.

La papa, importante alimento mundial (United Nations, Centro Internacional De La Papa, y FAO 2009) es el cultivo de más rápido crecimiento en regiones en desarrollo (Forbes et al. 2007). En Ecuador, la producen agricultores de 90 cantones para aportar el 7 % del producto interno bruto agrícola; abarcan el 7 % de la población agrícola económicamente activa. Según el INEC (2020) se siembran unas 20.626 ha de papa a lo largo del callejón interandino (entre los 2700 a 3400 msnm) (Ortiz y Forbes 2003, 48). La producción alcanza unas 275.346 t año⁻¹ (Instituto de Estadísticas y Censos INEC 2020, 19). Se la usa principalmente para comercializarla en mercados locales y regionales y para la subsistencia de pequeños agricultores (50 % de los productores) que ocupan el 19 % del área sembrada; además es la base de la alimentación de los pobladores de los Andes ecuatorianos (Kromann et al. 2011, 581).

Las epidemias de tizón tardío de la papa en el Ecuador se manifiestan en función de ciertas particularidades (Oyarzún, Taipei, y Forbes 2001, 18): se cultiva papa a lo largo del callejón interandino y del año provocando que el inóculo sea una amenaza constante (Kromann et al. 2011, 582) desde la siembra hasta la cosecha (Forbes y Landeo 2006, 288) de tal forma que el tizón tardío es extremadamente frecuente (Kromann 2007, 12). La población del patógeno es clonal y sobrevive en parientes silvestres y hospedantes alternos (tomate y pepino dulce) de la papa (Chacón et al. 2006, 236). La coexistencia de lotes aledaños que albergan plantas en diferente estado fenológico (Kromann, Taipei, et al. 2008, 569) proporcionan un refugio para que el patógeno y su peligro persista.

Un manejo sostenible de la enfermedad, bajo la compleja diversidad de los agroecosistemas ecuatorianos, debería integrar muchos componentes, dentro de un marco conceptual basado en el ciclo de vida de *P. infestans*. Los componentes de manejo, para

Ecuador, serían: i) reducción del inóculo inicial, ii) reducción de la tasa de progreso de la enfermedad y iii) reducción de la duración de la epidemia (Kromann 2007, 26). Con un adecuado y eficiente control químico del tizón tardío, se restringiría la tasa de progreso de la enfermedad y alcanzarlo requiere dilucidar varios aspectos del uso de los fungicidas, en la condiciones actuales y futuras.

3.3 Simulación del tizón tardío de la papa

La determinación de la frecuencia y número de aplicaciones de fungicidas necesarias para un control óptimo del tizón tardío, en una variedad de papa particular, cultivada bajo condiciones agroecológicas (temperatura del aire, precipitación, altura) específicas (Ortiz et al. 2004, 565), es una tarea difícil y costosa (Forbes et al. 2008, 162; Kranz 1990, 7; Dent y Blackie 1979); los modelos computarizados para la simulación de la enfermedad,¹⁵ solventan este inconveniente (Fry et al. 2009, 69; Harrison 1995, 216). El simulador LATEBLIGHT es un modelo matemático que simula determinísticamente epidemias de tizón tardío si se le proporciona datos climáticos y de resistencia del hospedero; ha sido modificado y actualizado para asistir al abordaje de preguntas de investigación de diversa naturaleza (Fry et al. 2009, 69) en el patosistema¹⁶ papa – *Phytophthora infestans* como el efecto del cambio global en el tizón tardío (Hijmans et al. 2000, 5), la epidemiología comparativa, control biológico, predicción del desempeño de la resistencia, capacitación (Forbes et al. 2008, 174) y el control con fungicidas (Hijmans et al. 2000, 5).

Los simuladores se conforman de submodelos para los procesos de infección: germinación de esporas, penetración, colonización y esporulación (Campbell y Madden 1991), que se integran para producir el desarrollo de la enfermedad en el tiempo. Estos procesos son parametrizados, con respecto al clima y otras variables (Forbes et al. 2008, 162). LATEBLIGHT es un modelo, de base diaria, en el que el desarrollo de una epidemia inicia cuando los esporangios (propágulos asexuales de *P. infestans*) aterrizan sobre las hojas y continúan con la infección, el crecimiento, la reproducción y la muerte

¹⁵ **Simulación de enfermedades:** es el “proceso de diseño de un modelo de un sistema real y la realización de experimentos con este modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema o para evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema” (Shannon 1975).

¹⁶ **Patosistema:** es un sistema de especies de hospederos y patógenos, influenciándose, entre ellos, a diferentes niveles de integración y afectando su dinámica poblacional, su genética y su evolución y que en conjunto están sujetos a los efectos del clima y de la actividad humana (Zadoks y Schein 1979; Agrios 2005).

consecuente. Todos estos procesos están influidos por el clima (particularmente la temperatura del aire y la duración de la humedad de la hoja) y por componentes de la interacción hospedero-patógeno como la eficiencia de infección y la TCL (Hijmans et al. 2000, 5). Sus versiones “LB1990” y “LB2004” son las más completas y utilizadas (Hijmans et al. 2000, 5).

A la fecha, muchos factores que influyen el tizón tardío no se conocen (extrema variabilidad de la esporulación dentro del campo y de la canopia de papa) y se incorporan como aproximaciones, suposiciones y conjeturas generando un error potencial (Harrison 1995, 216) Varios temas pendientes como la incorporación de los efectos de nuevos fungicidas y precisión de la pérdida del rendimiento incrementarían la utilidad de “LB2004” (Forbes et al. 2008, 174).

Capítulo segundo

Materiales y métodos

En la Estación Experimental Quito del Centro Internacional de la Papa, se estudió el efecto de la altitud (temperatura) sobre epidemias de tizón tardío y sobre la eficiencia de fungicidas para su control. Para la fase de campo se usaron parcelas de papa, con y sin fumigación, sembradas a diferentes alturas; se registró la epidemia en las parcelas fumigadas con fungicidas sistémicos a diferentes intervalos de tiempo y la epidemia natural en las parcelas sin fumigación. En la fase de gabinete se depuró la información, se calcularon las variables y se simularon las epidemias observadas.

El efecto de la altitud (temperatura) sobre el desarrollo de epidemias de tizón tardío se estudió en las parcelas sin control y la eficiencia de los fungicidas dimetomorph, fosfito de potasio y cimoxanil aplicados con intervalos de 7, 14 y 21 días en las parcelas fumigadas; ambos tipos de parcelas conformaron un diseño experimental factorial más adicional; se instalaron estos experimentos uno a 2700 msnm y otro a 3050 msnm; en estos experimentos se evaluó el área foliar afectada, con estas valoraciones se calculó la tasa aparente de infección y la severidad; la significancia estadística de los factores e interacciones se estableció mediante análisis de varianza. Se registraron variables climáticas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y epidemiológicas (humedad de la hoja) que luego se disgregaron en varios segmentos del día para identificar las diferencias de cada sitio experimental. Se modificó el simulador LB2004 con parámetros epidemiológicos de una interacción entre la variedad superchola con el linaje EC-1 de *P. infestans*; realizado esto se simuló las epidemias naturales y con fungicidas que se observaron; se comparó las gráficas del desarrollo de la epidemia y la severidad, observadas y simuladas, para cada tratamiento y en cada altura.

1. Fase de campo

1.1 Ubicación y factores en estudio

Los experimentos se ubicaron, uno en el lote B2 del CIP-Quito y el otro, en el lote Celdas (sección oriental de la Estación Experimental Sta. Catalina del INIAP, Tabla 1).

Tabla 1
Principales características agro-ecológicas de los sitios experimentales

Sitios experimentales	CIP-Quito	Celdas
Ubicación¹		
Provincia	Pichincha	Pichincha
Cantón	Mejía	Mejía
Parroquia	Cutuglahua	Uyumbicho
Lugar	Sta. Catalina	Sección Oriental
Latitud	0°22'12.10"S	0°22'04"S
Longitud	78°33'23.00"O	78°30'55"O
Altitud (msnm)	3050	2700
Condiciones meteorológicas¹		
Temperatura (°C)	12.4	14.3
Humedad Relativa (%)	79	80
Precipitación (mm)	1160.7	1227.2
Clasificación ecológica²	Bosque altimontano	Bosque altimontano
Características del suelo³		
Origen	Volcánico	Volcánico
Clasificación	Andosoles	Andosoles
Textura	Franco	Franco
Estructura	Subangular	Subangular
Pendiente (%)	0	2
Drenaje	Bueno	Bueno
Cultivo anterior	Vicia - Avena	Barbecho

Fuente: 1) Anuario Meteorológico 2013 (INAMHI 2017); 2) Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro (Josse et al. 2009, 45); 3) Departamento de manejo de suelo y aguas de la Estación Sta. Catalina del INIAP.

Elaboración propia

Se estudiaron dos sitios a diferente altitud (para capturar la influencia de dos temperaturas sobre la epidemia), tres fungicidas sistémicos (en adelante fungicidas), tres intervalos de aplicación (en adelante intervalos) y testigos sin aplicación de fungicidas para el desarrollo de epidemias naturales (en adelante testigo). En la Tabla 2 se pueden observar los efectos y niveles de cada factor, y las respectivas interacciones (en adelante tratamientos) del experimento consolidado.

1.1 Diseño experimental

Los 10 tratamientos se organizaron en un diseño de bloques divididos (DBD) en el que, para facilitar el manejo, no se aleatorizaron los tratamientos sino los intervalos dentro de cada bloque; se dispusieron 4 repeticiones que conformaron un experimento

factorial más adicional ($3 \times 3 + 1$) en cada sitio experimental (Little y Hills 1979). El efecto de la altitud se estudió, incluyéndola como factor, en un experimento complejo con 20 tratamientos ($2 \times 3 \times 3 + 2$) consolidando los datos obtenidos en cada sitio experimental (EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization) 2012).

Tabla 2
Factores, niveles, tratamientos e interacciones del experimento general

Factores	Niveles	Tratamientos		Efectos individuales e interacciones	
Altitud (t)	a1 ^a = 3050 msnm	t1 = a1f1i1	t11 = a2f1i1	a	efecto individual
	a2 ^b = 2700 msnm	t2 = a1f1i2	t12 = a2f1i2	f	efecto individual
		t3 = a1f1i3	t13 = a2f1i3	i	efecto individual
Fungicidas (f)	f1 = cimoxanyl	t4 = a1f2i1	t14 = a2f2i1	a X f	efecto simple
	f2 = dimetomorph	t5 = a1f2i2	t15 = a2f2i2	a X i	efecto simple
	f3 = fosfito de K	t6 = a1f2i3	t16 = a2f2i3	f X i	efecto simple
	SF = sin fungicida	t7 = a1f3i1	t17 = a2f3i1	a X f X i	efecto simple-simple
Intervalos de aplicación	i1 = 7 días	t8 = a1f3i2	t18 = a2f3i2		
	i2 = 14 días	t9 = a1f3i3	t19 = a2f3i3		
	i3 = 21 días	t10 = a1SF	t10 = a2SF		

Fuente: Diseño experimental: Temperatura promedio = ^a = 12 °C; ^b = 14 °C

Elaboración propia

1.2 Unidad experimental

Cada tratamiento se dispuso en parcelas de 22 m² de área. Cada parcela estuvo conformada por 5 surcos (separados 1.1 m entre ellos) de 4 m de longitud; cada surco albergó 13 plantas y cada parcela 65 plantas sembradas a 0.3 m entre ellas. El área total del experimento fue de 1643 m². El aislamiento de las parcelas se describe más adelante. El esquema del experimento fue similar en cada sitio experimental (Anexo 4).

1.3 Variables

1.3.1. Clima

En cada sitio experimental, se registró la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, con intervalos de 10 minutos. Se calculó la duración de la humedad de la

hoja (período húmedo, en h, en el cual la humedad relativa es superior al 85 %) a partir de los datos de humedad relativa (Andrade-Piedra, Hijmans, Juárez, et al. 2005, 1206).

1.3.2. Tasa aparente de infección (r)

Las epidemias policíclicas son representadas por un modelo logístico según el cual en un corto periodo de tiempo (dt) durante la duración del cultivo, la tasa absoluta de la enfermedad $\frac{dy}{dt}$ se incrementa en función de la cantidad de inóculo (y_0), de la eficiencia de este inóculo (r_L) y de la proporción de tejido disponible para el patógeno ($1-y$). La Tasa Aparente de Infección (en adelante TAI) califica la rapidez de progreso de la epidemia de tizón tardío y se la expresa como tasa por día (Van der Plank 1963, 22; Fry 1978, 1651). La ecuación logística para obtener la tasa de incremento logarítmico (r) (López 2000) utilizada fue la siguiente:

$$\frac{dy}{dt} = y_0 r_L (1 - y)$$

1.3.3. Severidad del tizón tardío

Se registró la severidad del tizón tardío (en adelante severidad), mediante periódicas estimaciones visuales del porcentaje del área foliar afectada¹⁷ (en adelante AFA) utilizando como referencia la clave de escala de daño (Anexo 5) con valores de 1 (más del 90 % de follaje con tizón tardío) a 8 (menos de 10 % de follaje con tizón tardío) (Cruickshank, Stewart, y Wastie 1982). Con estas observaciones se calculó el Área Bajo la Escalera de Desarrollo de la Enfermedad (en adelante ABEDE). Posteriormente se calculó el ABEDE relativo (en adelante ABEDER) ya que esta variable es adecuada para comparar epidemias de diferentes sitios. Los cálculos de ABEDE y ABEDER se realizaron mediante la metodología y el ajuste sugerido por Simko y Piepho (2011).

¹⁷ **Área foliar afectada:** Proporción de la superficie foliar con síntomas de tizón tardío (Henfling 1987, 19).

1.3.4. Emergencia

Se contó el número de plantas emergidas y se expresó como proporción del número de plantas sembradas; el valor se expresó en porcentaje. Se registró la fecha en la que, la mayoría de, las parcelas alcanzaron el 80 % de emergencia.

1.3.5. Inicio de la enfermedad

Se registró la fecha en que se observó los primeros síntomas de tizón tardío en cada parcela.

2. Fase de gabinete

2.1 Preparación de bases de datos climática y de severidad

La información de las lecturas del AFA y climática, recolectada por los sensores, que se obtuvo en campo fue depurada y configurada para ser analizada y dilucidar el efecto de la altitud (temperatura) en la eficiencia de fungicidas y recrearlo mediante simulación siguiendo el manual de usuario de “LB2004” (Andrade-Piedra, Hijmans, y Forbes 2007).

2.2 Análisis estadístico y funcional

Se exploró la significancia del efecto de los factores altura, fungicidas e intervalos sobre la severidad, de tizón tardío, mediante un análisis de varianza (en adelante ANOVA por sus siglas en inglés) (Hau y Kranz 1990). Además, se realizaron análisis de efectos simples para analizar las interacciones, de primer y segundo grado siempre y cuando estas presenten significancia estadística (Sahagún-Castellanos, Martínez-Garza, y Rodríguez-Pérez 2008, 218). Las pruebas de Tukey al 5 % permitieron diferenciar los promedios de los factores fungicidas, intervalos y tratamientos. Para diferenciar los promedios de la altura y contrastes ortogonales significativos se utilizó la prueba DMS al 5 %. Se realizaron comparaciones de interés mediante contrastes ortogonales y el efecto del incremento del intervalo se estudió con polinomios ortogonales (Snedecor y Cochran 1967, 403). Para el análisis de los datos y el reporte de resultados se usaron los

procedimientos MEANS, UNIVARIATE, GLM, GPLOT y GCHART del Software SAS V 9.4.2 (SAS Institute Inc, 2019).

2.3 Simulación

Las simulaciones de las epidemias naturales se realizaron con la versión del simulador LB2004 (Andrade-Piedra, Hijmans, Forbes, et al. 2005) que corre con un código de Macro-SAS¹⁸ (SAS Institute Inc., Cary, NC). Esta versión está parametrizada para variedades de papa que se cultivan en Perú (Yungay, Amarilis y Tomasa). En esta investigación se la modificó con los parámetros epidemiológicos PL, TCL y TE específicos de la variedad superchola interactuando con la población clonal EC-1 de *P. infestans* obtenidos en varios estudios (Arturo Taípe, datos no publicados) (Kromann et al. 2007, 86) ya que así se incrementa la precisión de las simulaciones (Kromann 2007, 37). Para las epidemias con fungicidas se utilizó el submodelo de fungicidas de LATEBLIGHT que fue desarrollado y validado específicamente para el fungicida protectante Clorotalonil (Bruhn y Fry 1982). En esta investigación se introdujeron varias modificaciones que mejoran su desempeño (Blandón-Díaz et al. 2011) cuyas especificaciones se detallan en el (Anexo 6).

Una vez parametrizado se corrió el simulador; en primer lugar, se introdujeron en LB2004 los valores de fecha de inicio de la epidemia, la cantidad de inóculo inicial y la duración de la humedad de la hoja; a continuación, se ingresa la información de clima, registrada en cada sitio experimental, que impulsa a LB2004 para obtener el AFA (en forma de curvas de desarrollo de la enfermedad) y el AUDPC simulados.

2.4 Desempeño del Modelo

El desempeño del modelo se evaluó comparando gráficamente las curvas de progreso de la enfermedad observadas y simuladas, con esto se logró:

- evaluar el ajuste entre los datos observados y pronosticados del progreso de la enfermedad con y sin fungicidas
- Identificar el patrón general de severidad de la enfermedad en relación con el aumento del intervalo de aplicación de fungicidas.

¹⁸ Se puede solicitar una copia de la versión LB2004 de LATEBLIGHT a j.andrade@cgiar.org

La evaluación numérica del desempeño del simulador se realizó en función de las desviaciones entre los valores de AUDPC observados y simulados. Las desviaciones se compararon con una prueba de sobre de aceptación (PSA), cuyos límites se calcularon a partir del error de los valores observados (Mitchell 1997, 319).

2.5 Métodos específicos de manejo de los experimentos de campo

Preparación del terreno. Se efectuaron una labor de arado, dos de rastra y la surcada con tractor.

Siembra. Se realizó colocando al fondo del surco un tubérculo-semilla brotado de la variedad superchola, posteriormente se lo tapó con tierra en forma manual utilizando un azadón.

Labores culturales. El control de malezas (rascadillo) se realizó en forma manual a los 30 días después de la siembra (en adelante DDS). A los 60 DDS, se hizo el medio aporque, y finalmente el aporque a los 75 DDS.

Fertilización. Se fertilizó siguiendo las recomendaciones derivadas del análisis de suelo realizado en el Departamento de Manejo de Suelos y Aguas del INIAP. El aporte de nitrógeno en forma de urea se aplicó en el aporque.

Control de plagas. Para prevenir el ataque de gusano blanco (*Premnotrypes vorax* Hust), se utilizó la metodología MIP recomendada por el Departamento Nacional de Protección Vegetal (Gallegos, Ávalos, y Castillo 1997). y para pulguilla (*Epitrix* sp.), se utilizó las recomendaciones del INIAP para plagas secundarias (Oyarzún et al. 2002).

Aplicación de fungicidas. Se aplicaron los fungicidas con los intervalos propuestos¹⁹ y en las dosis proporcionadas por las empresas que comercializan los fungicidas evaluados. Fueron aplicados sin añadir ningún tipo de coadyuvante. El cimoxanil de grado técnico se diluyó en acetona antes de su aplicación. Se usaron bombas de mochila CP-3 de 20 l con boquillas de cono hueco HC-035 que llevaron acopladas válvulas de presión constante (CFValve R11-16SY; G.A.T.E, Sebastian, FL) para garantizar la descarga homogénea en todos los tratamientos y sitios experimentales. Se sembraron barreras de avena de 1 m alrededor de las parcelas para aislarlas y contrarrestar

¹⁹ Generalmente se recomienda aplicar fungicidas sistémicos comerciales (ingrediente activo sistémico más protectante) con intervalos de 14 días; en esta investigación se redujo y se amplió este intervalo para estudiar su efecto.

el efecto de la deriva²⁰ de los fungicidas y del inóculo de *P. infestans* entre parcelas adyacentes.

Periodicidad de la evaluación del AFA. Las lecturas del AFA se realizaron cada 4 días e iniciaron inmediatamente después de la emergencia.

Testigos. En cada sitio experimental, se incluyeron parcelas adicionales, testigo a libre infección, para recabar información de la epidemia natural de tizón tardío observada, que fueron útiles para contrastar el efecto de los tratamientos.

Registro climático. Los agentes meteorológicos se registraron mediante sensores de temperatura y humedad relativa HOB0 modelo H08-032-08 (Onset Computer Corporation, Bourne, MA) y precipitación Watchdog Rain Gauge modelo 3524WD (Spectrum Technologies Inc, Plainsfield, IL). Para transferir la información, de los sensores al computador, se utilizó los softwares Specware 6.0 y BoxCar Pro 4.3. Se calcularon estadísticos como promedios generales y diarios de cada variable climática. Para la duración de la humedad de la hoja se consideraron estadísticos como: valores máximos, mínimos y rangos. Estos estadísticos fueron diferenciados por segmento del día de la siguiente manera: madrugada (0:00 a.m. – 6:00 a.m.); mañana (6:00 a.m. – 12:00 p.m.); tarde (12:00 p.m. – 18:00 p.m.); noche (18:00 p.m. – 24:00 p.m.). Este procesamiento de la información climática fue muy útil para contrastar y discutir los resultados obtenidos en cada sitio experimental.

2.1 Métodos específicos en la fase de gabinete

Conceptualización de calentamiento global en los Andes como efecto de la altura. Sutherst et al. citados por Juroszek (2020, 180) mencionan que para investigar el cambio climático existe el enfoque de *coincidencia climática*, mediante el cual en un área geográfica de interés se elige un sitio con un clima actual análogo al clima futuro y en este lugar se estudia la dinámica de enfermedades vegetales. Esta forma práctica de recrear (bajo condiciones naturales) el efecto del calentamiento global (pronosticado por los GCM) (Chakraborty et al. 2008, 3), permite la observación simultánea de epidemias en dos sitios dentro de una misma zona agroecológica, pero localizados a diferente altura

²⁰ **Deriva:** Es el movimiento en el aire, de un sitio a otro del área tratada, de gotas o partículas de pesticida al momento de aplicarlo o inmediatamente después (US EPA 2014).

sobre el nivel del mar. Así, el gradiente adiabático,²¹ de los Andes, permite considerar la temperatura del aire promedio, como variable determinante de la epidemiología del tizón tardío, la degradación de los fungicidas y el desarrollo del hospedero, en alturas específicas. Varios autores y un estudio específico de un modelo de simulación de la productividad de la papa, reportan gradientes adiabáticos andinos de -0.54 a -0.65 °C cada 100 m⁻¹ (Stoll et al. 1991; Knapp 1991, 22; Kromann 2007, 23; Buytaert, Céleri, y Timbe 2009, 2; Van der Hammen y Hooghiemstra 2000, 730); de acuerdo a esto, los sitios experimentales seleccionados, tuvieron una diferencia de 2 °C aproximadamente como se aprecia en la Tabla 1. Únicamente la temperatura promedio y la precipitación fueron diferentes, los demás factores agro-meteorológicos fueron similares lo que permite considerar que los efectos observados, y sus diferencias, son función de estas principalmente. Otros investigadores, en ausencia del gradiente adiabático, abordan la influencia de temperatura del aire sobre la eficiencia de los fungicidas sistémicos, comparando las epidemias de tizón tardío de la papa observadas en años más fríos o más calurosos (Mayton et al. 2001, 1008) o recrean el efecto del calentamiento global sobre la epidemia del tizón tardío, experimentando en condiciones ambientales versus condiciones controladas bajo invernadero (Kaukoranta 1996).

Selección de fungicidas. Se utilizaron fungicidas sistémicos puros (sin mezclas con otros ingredientes activos) (Greiner et al. 2019, 46), para minimizar las complejas interacciones del clima y el efecto de sinergia entre ingredientes activos con más de un modo de acción. El cimoxanil (control positivo), es un fungicida translaminar (movimiento acropétalo y basipétalo muy limitado) (Samoucha y Gisi 1987, 397), que combinado con mancozeb es la mezcla comercial más utilizada por los productores ecuatorianos (Kromann, León, et al. 2008, 1098; Crissman et al. 1998); ante la imposibilidad de encontrar un producto comercial solo con cimoxanil, se optó por utilizar el ingrediente activo, de grado técnico, en polvo. El dimetomorph es un fungicida translaminar con escasa sistemia y propiedad anti-esporulante y que limita el crecimiento del micelio de *P. infestans*, tiene cierta actividad curativa (post infección) pero se lo recomienda para uso preventivo; la adición de coadyuvantes incrementa su efecto residual (hasta 15 días) y su eficiencia (Grayson, Batten, y Walter 1996, 355; Cohen, Baider, y Cohen 1995, 1500; Schwinn y Margot 1991); es ampliamente utilizado en la región papera y formó parte del estudio pues existe una presentación (en polvo) sin mezcla con

²¹ **Gradiente adiabático:** Es la variación de temperatura que experimentan las masas de aire en movimiento vertical o el descenso de la temperatura a mayor altura sobre el nivel del mar (Knapp 1991).

otro ingrediente activo (Chacón et al. 2001). Fosfito de K, que es un fungicida líquido que penetra rápidamente en la planta y una vez dentro se transforma en fosfonato, o por hidrólisis en ácido fosforoso, ambos compuestos tienen propiedades fungicidas que afectan directamente la germinación de esporangios y el crecimiento del micelio; presenta elevada sistemia (acropétala y basipétala) (Schwinn y Margot 1991) y muy bajo impacto para la salud y el ambiente por lo que es recomendado y usado en producción orgánica y como alternativa al mancozeb (Kromann et al. 2012).

Estimación de la TAI. La cuantificación de la tendencia de la epidemia de tizón tardío se fundamenta en la regresión lineal de la cantidad de enfermedad contra el tiempo. La pendiente de esta regresión (r) equivale a la velocidad de incremento logarítmico o exponencial de la enfermedad o TAI. En hospederos susceptibles bajo condiciones ambientales favorables la multiplicación del patógeno es rápida y en consecuencia se eleva la TAI y r alcanza valores altos (López 2000). La TAI sirve para comparar (identidad o diferencia) curvas de progreso de una misma enfermedad en distintos periodos, localidades o tratamientos de manejo (aplicación de fungicidas) utilizando el parámetro r que integra los efectos del hospedero, del patógeno y del ambiente.

Estimación de la severidad. Por norma general, la combinación de múltiples observaciones del AFA, que representan el progreso de la enfermedad a lo largo del cultivo, en un solo valor (severidad) se realiza calculando el Área Bajo la Curva de Desarrollo de la Enfermedad (en adelante AUDPC) utilizando la metodología de integración trapezoidal (Berger 1988); no obstante, este método incurre en una importante subestimación de la primera y la última observación. El cálculo del Área Bajo la Escalera de Desarrollo de la Enfermedad (en adelante ABEDE) permite solventar este inconveniente mejorando la precisión de la estimación del incremento de la severidad (Simko y Piepho 2011). La forma estandarizada (ABEDER) permitió comparar estadísticamente la severidad de los tratamientos de cada sitio experimental dentro de un experimento complejo que incluyó el factor altitud y se la obtuvo dividiendo los valores del ABEDE para los días de duración de la epidemia del testigo sin aplicación (de cada sitio experimental) por 100 (Forbes, Pérez, y Andrade-Piedra 2014, 21; W. G. Pérez y Forbes 2008, 34).

Análisis estadístico. La pertinencia de los ANOVAS se calificó verificando los supuestos de independencia y normalidad de residuos, y la homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) (EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization) 2012). Cuando el análisis de varianza estableció diferencias significativas para la

interacción ($P = < 0.0001$), se realizó un análisis de efectos simples para comparar entre sí los niveles del factor fungicidas dentro de cada nivel del factor intervalos y viceversa. Se procedió de igual manera para las interacciones significativas en el experimento complejo. Al contrario, cuando una interacción resultó no significativa, se analizó los factores individualmente (Sahagún-Castellanos, Martínez-Garza, y Rodríguez-Pérez 2008).

Capítulo tercero

Resultados

1. Clima y epidemias en los sitios experimentales

La distribución de la temperatura, humedad relativa y precipitación, a lo largo del periodo de estudio, mostraron patrones generalmente similares a 3050 msnm y 2700 msnm (Figura 1). A 3050 msnm se registraron promedios diarios de: temperatura = 11.6 °C, humedad relativa = 82.5 % y acumulados de: P = 336.6 mm y duración de la humedad de la hoja = 1228 h. A 2700 msnm se registraron promedios diarios de: temperatura = 13.7 °C, humedad relativa = 84.2 % y acumulados de: P = 336.7 mm y duración de la humedad de la hoja = 1357 h. Estadísticamente, 2700 msnm fue el sitio más cálido y húmedo en el que el follaje permaneció mayor tiempo mojado (a pesar de que la cantidad de precipitación acumulada fue similar en las dos alturas). La mayor amplitud de temperatura se observa en el periodo diurno a 2700 msnm con registros que alcanzan hasta 5.5 °C más altas que a 3050 msnm (Anexo 7).

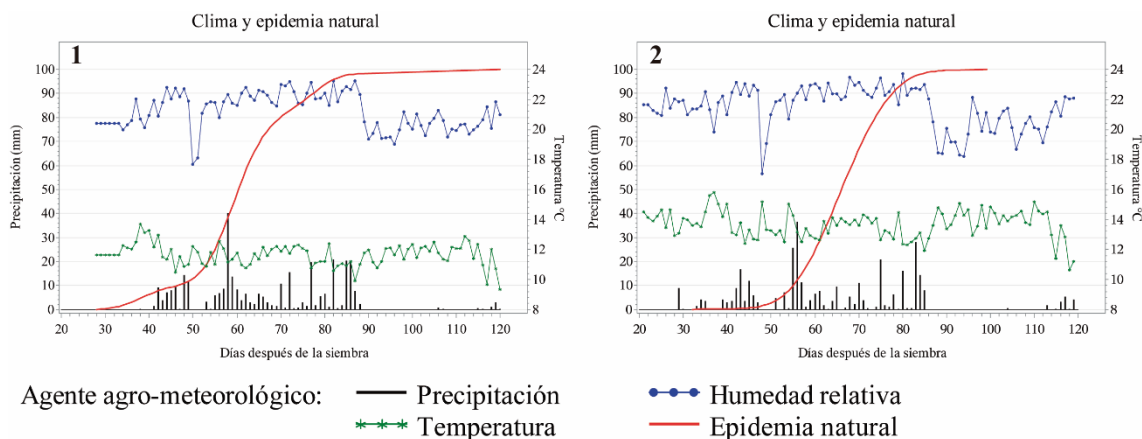


Figura 1. Comportamiento de los agentes climáticos registrados durante la fase experimental de campo a 3050 msnm (1) y 2700 msnm (2).

Fuente: Caracterización de la estación de cultivo marzo – julio 2013

Elaboración propia

Las tendencias generales de la temperatura, humedad relativa y precipitación, en cada segmento del día, fueron muy similares a 3050 msnm y 2700 msnm. La amplitud diaria de la temperatura y la humedad relativa fue mayor en el periodo diurno y menor en periodo nocturno, no obstante, claramente mayor a 2700 msnm que a 3050 msnm. Las temperaturas más bajas ocurrieron en la madrugada (3.6 °C y 4.2 °C para 3050 msnm y

2700 msnm respectivamente) y las más altas en la tarde (21.2 °C y 26.7 °C para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente). Los valores máximos de humedad relativa fueron independientes del periodo diurno o nocturno, cuyos valores más bajos se observaron únicamente en el periodo diurno. En el periodo entre las 9:00 am y las 18:00 pm, si bien la humedad relativa es alta no alcanza la saturación (100 %) a 3050 msnm mientras es una condición permanente a 2700 msnm. Así, a 2700 msnm los promedios de humedad relativa siempre fueron más altos con excepción de la tarde (12:00 – 18:00 pm) donde son ligeramente más altos a 3050 msnm. Es en la tarde (14:00h - 19:00h) donde la presencia de precipitación es más frecuente (Anexo 7 y Figura 2). En el Anexo 7 se aprecia que se acumulan mayor cantidad de h con hojas húmedas durante la noche y la madrugada, tanto a 3050 msnm como a 2700 msnm; sin embargo, es en las mañanas donde son estadísticamente distintas entre ambas alturas (Figura 3).

Los menores promedios diarios de temperatura ocurrieron en la madrugada (8.3 °C y 10.1 °C para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente); elevándose en la mañana (12.8 °C y 14.5 °C para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) hasta maximizarse en la tarde (15.4 °C y 18.1 °C para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) y descendiendo otra vez en la noche (10.1 °C y 12 °C para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente). Los menores promedios diarios de temperatura, de 3050 msnm frente a 2700 msnm, son diariamente constantes, alcanzando cierta similitud entre las 7:00 y 8:00 am y la mayor disparidad entre las 13:00 y 14:00 pm (Figura 2). El comportamiento de la humedad relativa fue opuesto al de la temperatura pues sus promedios diarios más altos ocurrieron en la madrugada (92.5 % y 95.9 % a 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) decayendo en la mañana (76.9 % y 79 % para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) hasta se mínimos en la tarde (70.2 % y 68.2 % para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) y elevándose otra vez en la noche (90.6 % y 94.8 % para 3050 msnm y 2700 msnm respectivamente) (Figura 2 y Anexo 7).

1.1 Epidemias naturales

Los experimentos se sembraron la primera semana de marzo y las precipitaciones iniciaron alrededor de los 30 DDS y se extendieron hasta finales de mayo (90 DDS).

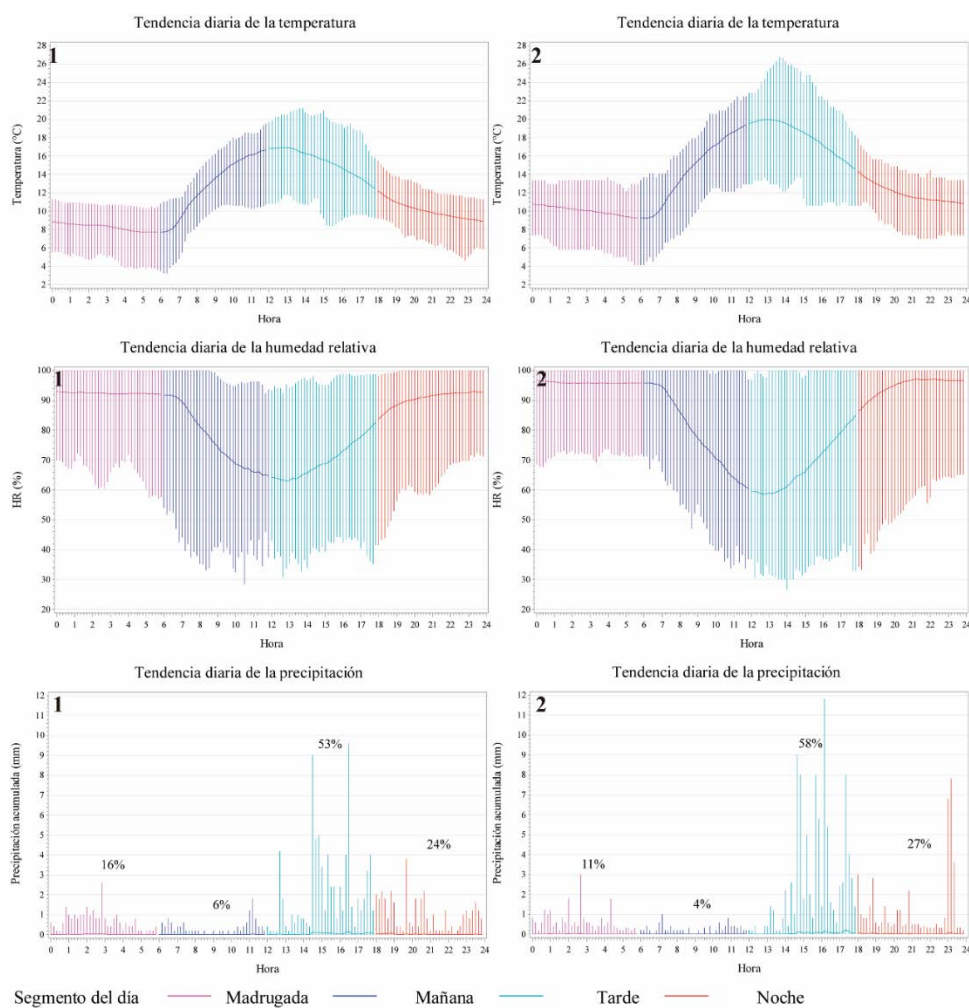


Figura 2. Tendencia y amplitud del microclima en 4 segmentos del día a 3050 msnm (1) y 2700 msnm (2)

Fuente: Registro climático durante la epidemia de tizón tardío

Elaboración propia

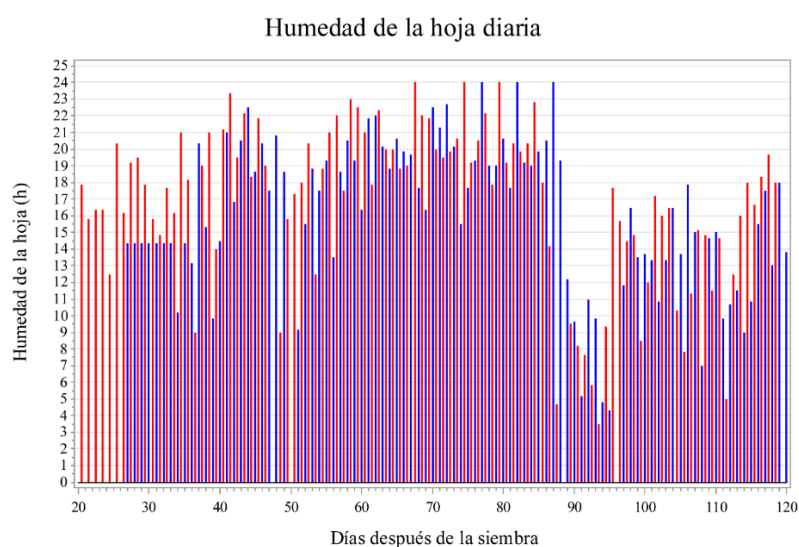


Figura 3. Acumulación diaria de las horas de humedad de la hoja a 3050 msnm (—) y 2700 msnm (—)

Fuente: Registro climático durante la epidemia de tizón tardío

Elaboración propia

Las precipitaciones incrementaron la humedad relativa en este periodo y los promedios más bajos se observaron en junio y julio (> 90 DDS) que son meses generalmente secos. La epidemia natural del tizón tardío de la papa, observada tanto a 3050 msnm como a 2700 msnm (Figura 1), delineó un patrón en el que se observan las tres fases típicas de una epidemia policíclica con inicio lento, rápido desarrollo y una meseta final producto de la mortalidad de la totalidad de las plantas (Kaukoranta 1996, 312). A 3050 msnm, la infección inicial ocurre a los 20 DDS y al cabo de 7 días la epidemia empieza su progresión (adelantándose 15 días a lo ocurrido a 2700 msnm); esta progresión se detiene por 10 días luego de lo cual nuevamente progresa de manera constante (aunque menos intensa que a 2700 msnm) razones por las que finaliza al cabo de 60 días desde su inicio. A 2700 msnm la epidemia inició alrededor de los 35 DDS, continuó con una fase de progreso intenso a partir de los 50 DDS y transcurridos 30 días finaliza.

1.2 Epidemias con fungicidas

Una observación y comparación general, de las curvas epidemiológicas de cada tratamiento evaluado, con la curva de desarrollo de la epidemia natural, permite apreciar que la aplicación de fungicidas por 10 ocasiones con el intervalo de 7 días, 5 ocasiones con el intervalo de 14 días y 4 ocasiones con el intervalo de 21 días retrasó el inicio, inhibió parcialmente el desarrollo y redujo la severidad de la epidemia del tizón tardío. Dependiendo del fungicida y del intervalo, las epidemias se grafican como curvas menos pronunciadas y con reducidos incrementos constantes en el tiempo (Anexo 8).

El dimetomorph retrasa el inicio de la epidemia principalmente a 3050 msnm (65 días con intervalos de 7 días y 24 días con intervalos de 14 y 21 días) y en menor grado a 2700 msnm (22, 20 y 14 días con intervalos de 7, 14 y 21 días respectivamente); el progreso de la epidemia es relevante únicamente con el intervalo de 7 días, aunque a 2700 msnm este efecto disminuye al final. Fosfito de K también retrasa el inicio de la epidemia, aunque en menor magnitud (24 y 14 días con intervalos de 7 o 14 y 21 días respectivamente); a 2700 msnm este retraso es ligeramente inferior; el progreso de la epidemia se inhibió únicamente con aplicaciones cada 7 días y a 3050 msnm. Cimoxanil retardó entre 20 días (intervalos de 7 días) y 10 días (intervalos de 21 días) el inicio de las epidemias sin embargo estas progresaron de forma similar a las epidemias naturales; la epidemia a 3050 msnm se retrasó más (25 días) y progresó menos (Anexo 8).

2. Efecto de la altura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos

2.1 Tasa aparente de infección TAI (r) y severidad (ABEDER) del tizón tardío

En la Tabla 3, que resume el ADEVA se observa que los promedios de la interacción altitud X intervalos X fungicidas no presentan diferencias significativas para la TAI ($P = 0.096$) y si para el ABEDER ($P = 0.0006$). Por otro lado, si se establecen diferencias significativas entre los promedios de la TAI para las interacciones altitud X intervalos ($P = 0.018$), altitud X fungicidas ($P = 0.001$), intervalos X fungicidas ($P = 0.002$).

Los contrastes por polinomios ortogonales, para analizar el incremento constante de los intervalos, presentan diferencias estadísticas significativas entre los promedios de TAI y ABEDER para los efectos lineal y cuadrático ($P = <0.0001$). La comparación ortogonal de los promedios de TAI y ABEDER definió diferencias significativas para factorial versus testigo ($P = <0.0001$), 3050 msnm versus 2700 msnm ($P = <0.0001$) y fungicida translaminar versus fungicida sistémico ($P = 0.002$, $P = 0.042$) y ninguna diferencia entre cimoxanil versus fosfito de K en la TAI ($P = 0.95$) y ABEDER ($P = 0.12$) (Tabla 3). Los promedios de TAI van desde 0.03 por día hasta 0.23 por día y la menor TAI se obtuvo con dimetomorph aplicado cada 7 días a 3050 msnm y la mayor con cimoxanil aplicado cada 14 días y a 2700 msnm (Anexo 9).

La falta de significancia entre los promedios de TAI para la interacción de segundo grado altitud X intervalos X fungicida imposibilita realizar el análisis de efectos simples-simples ni tampoco la pruebas para la separación de promedios. En su lugar se realizó estos análisis para las interacciones de primer grado. Se establecieron diferencias significativas para cada uno de los niveles del factor en cada uno de los niveles diferenciadores excepto para el intervalo 21 días en el cual todos los fungicidas mostraron TAI similares estadísticamente (Anexo 10). Dimetomorph alcanzó las menores TAI y generalmente ocupa los primeros rangos en los diferentes intervalos; cimoxanil alcanza las más altas TAI (Figura 4). Los intervalos más frecuentes de 7 días reportan las más bajas TAI y se agrupan en el primer rango; esta tasa se va incrementando según los intervalos se hacen menos frecuentes alcanzando los valores más altos con intervalos de 21 días. Este patrón es muy marcado en dimetomorph, aunque no con fosfito de K y cimoxanil en el que la TAI es similar con intervalos de 14 y 21 días (Figura 5).

Tabla 3
ADEVA para la TAI (r) y la severidad (ABEDER) en el experimento del efecto de la altitud sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos en el control de epidemias de tizón tardío de la papa

Variable		Tasa Aparente de Infección (r)		Severidad (ABEDER)	
Fuente de variación	GL	Cuadrados medios	Pr > F	Cuadrados medios	Pr > F
Modelo	44	0.004	<0.0001 **	411	<.0001 **
Total	71				
Repetición	3	0.002	0.0655 *	11	0.5358
Intervalos	2	0.020	0.0002 **	5777	<.0001 **
Efecto lineal	1	0.019	<0.0001 **	5320	<.0001 **
Efecto cuadrático	1	0.020	<0.0001 **	6234	<.0001 **
Rep*Intervalos (Error a)	6	0.000	0.4758	13	0.6414
Fungicidas	2	0.016	<0.0001 **	1608	<.0001 **
Translaminares vs Fosfito	1	0.004	0.002 **	61	0.042 *
Cimoxanil vs Fosfito	1	0.000	0.9541 ns	34	0.1229 ns
Intervalos*Fungicidas	4	0.011	0.0015 **	272	<.0001 **
Intervalos(Rep*Fungicida)(Error b)	18	0.000	0.8519	10	0.9046
Altitud	1	0.068	<0.0001 **	324	0.0003 **
3050 msnm vs 2700 msnm	1	0.007	<0.0001 **	185	0.0006 **
Altitud*Intervalos	2	0.002	0.0184 *	476	<.0001 **
Altitud*Fungicidas	2	0.004	0.001 **	64	0.0492 *
Altitud*Intervalos*Fungicidas	4	0.001	0.0959 ns	129	0.0006 **
Factorial vs Testigo	1	0.025	<0.0001 **	2192	<.0001 **
Error c	27	0.000		19	
R ²		0.94		0.97	
C. V.:		16.6		12.9	
RMSE		0.0		4.3	
Promedio		0.1		33.7	

** = Significativo al 1 %; * = Significativo al 5 %; ns = no significativo

Fuente: Evaluaciones del AFA en dos sitios experimentales

Elaboración propia

La altura si tuvo un gran efecto pues se observó un gran contraste entre los promedios de TAI. A 3050 msnm se obtienen las menores TAI comparadas con 2700 msnm donde las TAI siempre aumentan. Las TAI aumentan proporcionalmente conforme aumentan los intervalos, conducta muy clara a 3050 msnm, aunque no tanto a 2700 msnm; los fungicidas presentan TAI similares en ambas elevaciones, excepto cimoxanil que a 2700 msnm es bastante más alta que a 3050 msnm. A 2700 msnm las TAI no son

diferentes de forma significativa, aunque son más altas que a 3050 msnm donde la menor se obtiene con un intervalo de aplicación de 7 días y la mayor con 21 días. Solo cimoxanil exhibe una TAI significativamente diferente a 2700 msnm (Anexo 11).

La prueba de Tukey (5 %) para diferenciar los promedios de severidad de los tratamientos (Figura 6) generó 7 grupos; los tratamientos con mejor control del tizón tardío cuyo ABEDER fue inferior a 10 se agruparon en el rango a y fueron: dimetomorph aplicado cada 7 días en ambas alturas y fosfito de K aplicado cada 7 días a 3050 msnm. No existió control del tizón tardío con el resto de tratamientos, pues permitieron de 2 hasta 8 veces más cantidad de enfermedad que los tratamientos del rango a. Es importante destacar en la Figura 6 que la combinación de dimetomorph y fosfito de K con intervalos de aplicación cortos (7 días) bajo temperaturas menos cálidas (3050 msnm), reduce la epidemia de manera efectiva; todo lo contrario, sucede con cimoxanil a intervalos extensos (21 días) incluso bajo temperaturas menos cálidas (3050 msnm); aunque lo más llamativo es fosfito de K a intervalos largos (14 y 21 días) que a 3050 msnm exhibe un nivel de epidemia ligeramente superior que a 2700 msnm pero que estadísticamente son iguales en ambas altitudes.

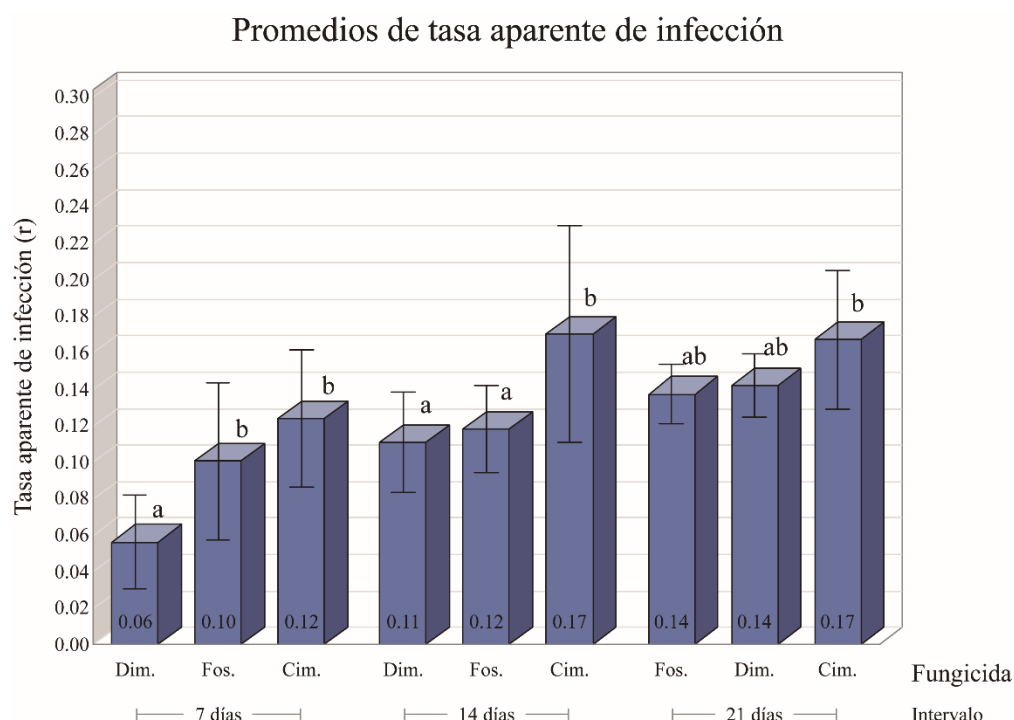


Figura 4. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) de intervalos diferenciados por fungicida. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 8 repeticiones

Fuente: Eficiencia de fungicidas sistémicos

Elaboración propia

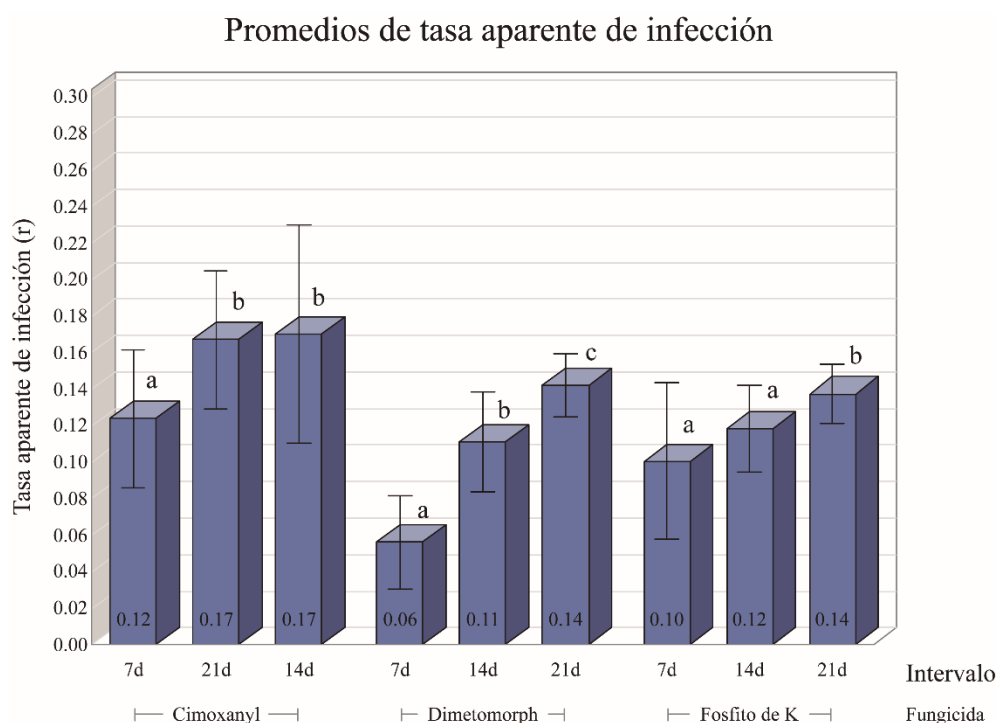


Figura 5. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) de fungicidas diferenciados por intervalos. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 8 repeticiones

Fuente: Eficiencia de fungicidas sistémicos
Elaboración propia

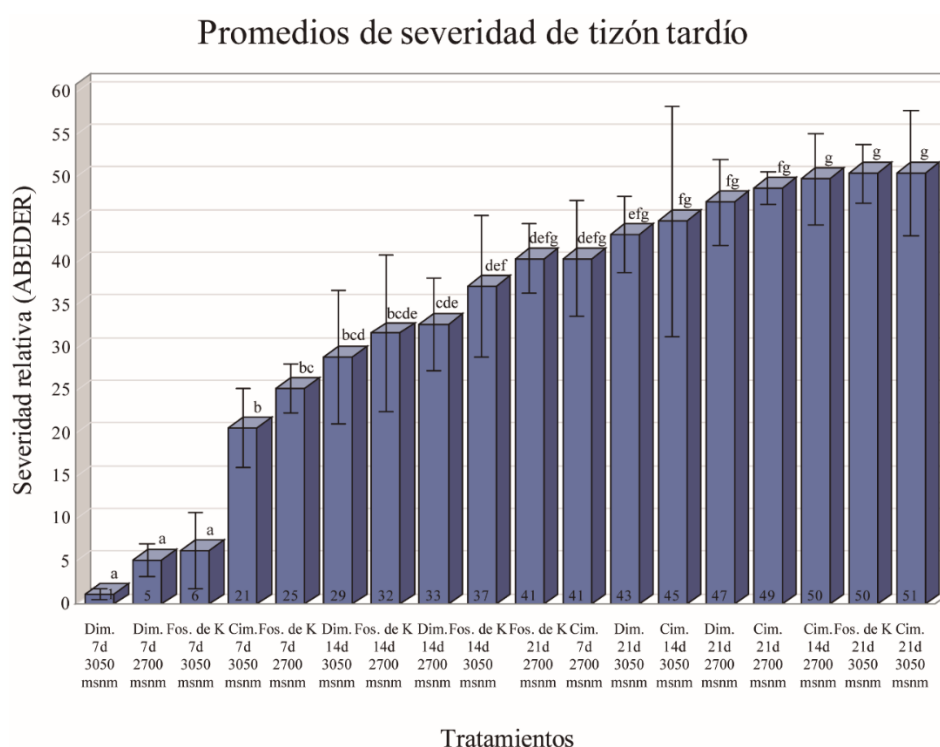


Figura 6. Promedios de severidad relativa (ABEDER) y rangos de Tukey (5 %) de tratamientos. Las barras de error representan el error estándar del promedio de 4 repeticiones. Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas

Fuente: Eficiencia de fungicidas sistémicos
Elaboración propia

En el Anexo 12 se observa el análisis de efectos simples-simples de la severidad relativa (ABEDER) de cada nivel de la interacción fungicidas X intervalos diferenciados por cada nivel del factor altitud. En la mayoría de interacciones no se establecieron diferencias significativas a excepción de cimoxanil cada 7 días ($P = <0.0001$) y fosfito de K cada 7 días ($P = <0.0001$) y cada 21 días ($P = <0.0032$). El mismo análisis, pero para cada nivel de la interacción fungicidas X altitud diferenciados por intervalo y para cada nivel de la interacción intervalos X altitud diferenciados por fungicida establecieron diferencias estadísticas significativas para todas las interacciones.

Al graficar los promedios de ABEDER de cada una de las interacciones intervalos X fungicidas por cada nivel de altitud, se observa que dimetomorph cada 7 días permite el menor nivel de enfermedad a 3050 msnm y que aumenta un 40 % a 2700 msnm. El fosfito de K aplicado cada 7 días alcanza un nivel de enfermedad más bajo (rango a) a 3050 msnm mientras a 2700 msnm la enfermedad se cuadruplica. Aplicando fosfito de K cada 14 y 21 días los resultados se invierten y se obtiene menos enfermedad a 2700 msnm. Con cimoxanil aplicado cada 7 días la menor cantidad de enfermedad ocurre a 3050 msnm y se duplica a 2700 msnm. Cimoxanil aplicado a 14 y 21 días y dimetomorph aplicado a 7, 14 y 21 días permiten mayores niveles de enfermedad a 2700 msnm, aunque son estadísticamente similares a 3050 msnm.

La separación de los promedios permite distinguir que, de forma general, la severidad observada a 3050 msnm aumenta a 2700 msnm (Anexo 13-1). La separación de promedios de ABEDER de la interacción altitud X fungicidas en cada intervalo permite observar que la cantidad de enfermedad es muy diferente en cada uno de estos. El rango a lo ocupan los valores mínimos del intervalo de 7 días y conforme este intervalo aumenta a 14 (rango b) y 21 días (rango c) la severidad también aumenta, conducta observada con todos los fungicidas a 3050 msnm y 2700 msnm. Dimetomorph obtiene bajos ABEDER únicamente con intervalos de 7 días pues la severidad de los otros intervalos se eleva constantemente. La severidad permitida por Fosfito de K y cimoxanil no fue particularmente contrastante entre los diferentes intervalos de aplicación y alcanzaron promedios de ABEDER altos con aplicaciones cada 7 días, excepto con fosfito de K con un intervalo de 7 días y a 3050 msnm donde si se observa una importante reducción de la severidad (Anexo 13-2).

Al separar estadísticamente los promedios de la interacción altitud X intervalos para cada fungicida se aprecia que la mayor eficiencia para reducir la severidad la obtienen, del mejor al peor, dimetomorph, fosfito de K y cimoxanil. Lo mencionado es

más evidente bajo el mejor régimen de aplicación, que como ya se mencionó fue 7 días, y conforme las aplicaciones se hacen menos frecuentes (14 y 21 días) el contraste entre la eficiencia de los fungicidas se minimiza ya que todos dejan de serlo (Anexo 13-3).

Los promedios de TAI y severidad del tizón tardío de un fungicida de bajo impacto ambiental (fosfito de K) frente al fungicida translaminar de mayor uso para el control del tizón tardío (cimoxanil) son muy similares. El promedio de TAI y de severidad de un fungicida sistémico (fosfito de K) es menor versus el de fungicidas translaminares. El efecto de fungicidas sistémicos aplicados con diversos intervalos (factorial) reduce la TAI (-25 %) y la severidad (-50 %) de la epidemia natural de tizón tardío (testigo). Los promedios de TAI y severidad más bajos se observaron a 3050 msnm pues el incremento de TAI (40 %) y severidad (10 %) registrado a 2700 msnm los hace estadísticamente diferentes (Anexo 11 y Anexo 14).

El análisis de los cuadrados medios, de los polinomios ortogonales, indicó que la variabilidad de las observaciones de cada intervalo de aplicación se ajusta mejor a un modelo cuadrático antes que lineal tanto en la TAI como en la severidad (Figura 7). El modelo cuadrático estableció una relación positiva directa esto es, a medida que se incrementa el número de días entre dos aplicaciones consecutivas, también se incrementa la TAI y la severidad. La mayor pendiente observada con intervalos cortos representa el mejor control de la epidemia que realizan frecuentes aspersiones de fungicidas, en este periodo se observa que cuando se incrementa un día en el intervalo de aplicación esto representa un incremento exponencial de la enfermedad.

Los valores de TAI y severidad más bajos (0.4 -0.8 y 0 – 10 respectivamente) se alcanzaron con intervalos de 7 días e indicarían su idoneidad para el control efectivo del tizón tardío. En otras palabras, aplicaciones frecuentes de fungicidas mantienen bajos niveles de tizón tardío los mismos que aumentan a medida que las aplicaciones de fungicidas se hacen esporádicas hasta alcanzar su máximo con intervalos de 21 días, posteriormente dejan de aumentar.

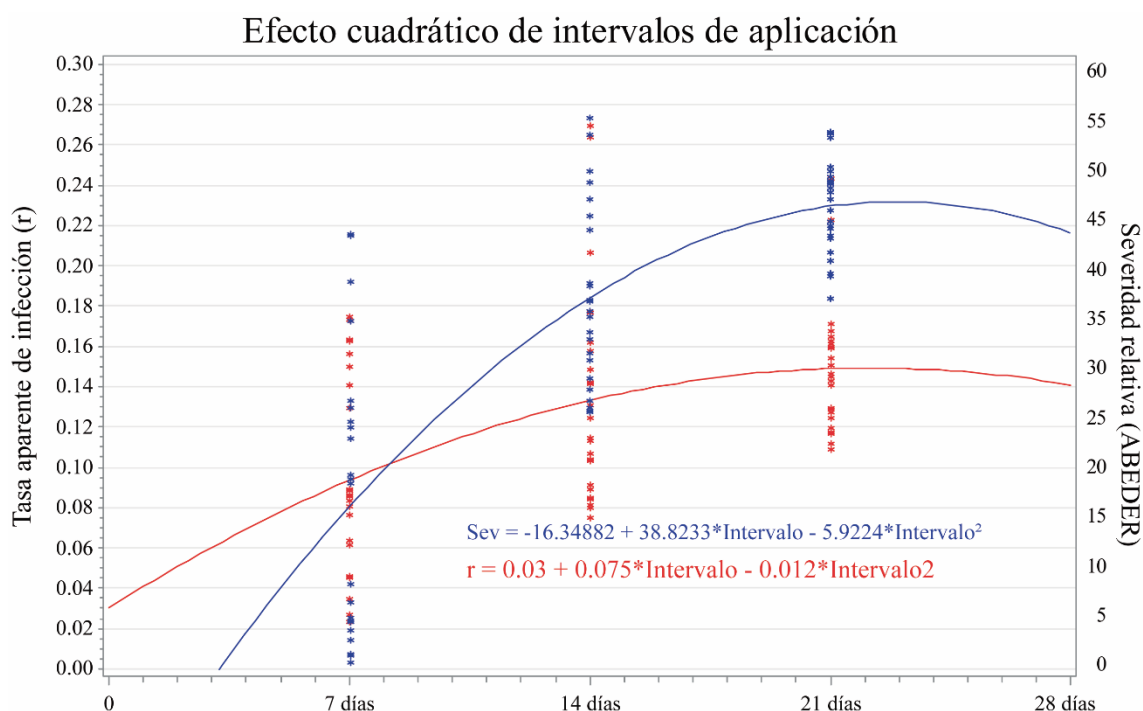


Figura 7. Efecto cuadrático sobre la TAI (r) y la severidad (ABEDER) del tizón tardío de la papa del factor intervalos de aplicación de fungicidas sistémicos

Fuente: Eficiencia de fungicidas sistémicos

Elaboración propia

3. Simulación de epidemias de tizón tardío de la papa

LB2004 simuló con bastante precisión el efecto del clima sobre las epidemias naturales de tizón tardío a 3050 msnm (12 °C) y 2700 msnm (14 °C) (Anexo 15-1, Anexo 16-1). Además, fue capaz de simular el efecto menos o más favorable para la epidemia, que se observó en cada altitud (Andrade-Piedra, Forbes, Shtienberg, et al. 2005, 1421). LB2004 también logra simular, de manera aproximada, las epidemias de los tratamientos con muy poca eficiencia para controlar epidemias del tizón tardío (Anexo 15-2-3-4-7-9 y Anexo 16-3-4-7-9). Contrariamente, si un tratamiento la controla eficientemente, la simulación con LB2004 es sobreestimada (Anexo 15-5-6-8-10 y Anexo 16-2-5-6-8-10). En general, las epidemias simuladas fueron similares a las observadas con los fungicidas cimoxanil y fosfito de K aplicados con intervalos amplios (14 y 21 días). dimetomorph y el intervalo de 7 días fueron efectivos, en casi todos los tratamientos, y el sub - modelo de fungicidas protectantes de LB2004, en estos casos sobrestimó la epidemia.

Capítulo cuarto

Discusión

1. Clima y epidemias en los sitios experimentales

Como lo recomiendan Shakya *et. al.* (2015) se asumió el día y no la temporada de cultivo como la unidad de análisis del clima para identificar diferencias que influyeran en la epidemia. La aparente similitud climática a 3050 msnm y 2700 msnm quedó descartada al disgregarla en varios segmentos del día. Las temperaturas más bajas ocurren en las madrugadas y a 3050 msnm y las más altas en la tarde y a 2700 msnm; la humedad relativa máxima es independiente del periodo diurno o nocturno, el 75 % de la precipitación se acumuló entre tarde y noche, en ambas alturas y la duración de humedad de hoja a 2700 msnm sobrepasó con 129 h lo alcanzado a 3050 msnm. La humedad relativa mínima a 3050 msnm ocurrió en la madrugada, mañana y noche y a 2700 msnm ocurrieron en la tarde (posible efecto de las temperaturas máximas en este segmento) (Figura 2). A 2700 msnm las condiciones fueron cálidas y con tardes lluviosas, más frecuentes; como se ha reportado (Kromann 2007, 24). Las condiciones climáticas a 3050 msnm fueron frías y con tardes húmedas. Las precipitaciones ocurrieron y fueron frecuentes en las madrugadas y mañanas, el desecamiento del follaje mayor redujo las horas de humedad de la hoja. Mayor frecuencia del clima ideal para el desarrollo de tizón tardío, ocurrió a 2700 msnm antes que a 3050 msnm.

1.1 Epidemias naturales

La temperatura del aire y la precipitación interaccionan para definir la humedad relativa y de la hoja; esta humedad a su vez posibilita la infección, establecimiento y desarrollo de la epidemia del tizón tardío en el follaje de la papa (Becktell, Daughtrey, y Fry 2005, 975; Harrison 1995, 217; Launay et al. 2014, 148).

La precipitación y un pico de temperaturas altas, alrededor de los 35 DDS, a 2700 msnm, favorecieron el agua libre y rocío en las hojas (Figura 1-2) (Harrison 1992, 397) para el inicio de la epidemia; transcurridos de 3 a 15 días se observaron los primeros síntomas. Alrededor de los 50 DDS, las precipitaciones se incrementaron y fueron

constantes, la temperatura tuvo un promedio diario entre 13 °C y 14 °C y la humedad relativa fue elevada (90 % - 95 %) propiciando un microclima muy conductivo para la acumulación de inóculo. Este microclima fue permanente e hizo que la epidemia progrese continua e intensamente (Harrison 1992, 391; Salinari et al. 2006, 1302). Esto se aprecia gráficamente con el elevado desarrollo de la epidemia, a partir de los 50 DDS (Figura 1-2), cuyo rápido avance exterminó la totalidad de plantas, sin protección de fungicidas, en 30 días.

El proceso epidemiológico descrito se repitió, con algunas matizaciones importantes, a 3050 msnm (Figura 1-1). El periodo hasta los 40 DDS fue caluroso y seco, ocurrió una infección primaria temprana (inóculo en brotes explicado más adelante) que adelantó el inicio de la epidemia. Las precipitaciones ocurrieron entre los 40 y 50 DDS, excepto un periodo seco de 10 días, la humedad relativa (80 %-90 %) interactúa con temperaturas entre 11 °C y 12 °C para darle continuidad a la epidemia, por un lapso de 40 días, y en 60 días destruir la totalidad de plantas. A 3050 msnm el inóculo, ubicuo y seleccionado (Andrivon et al. 2007, 340) para la variedad superchola, posiblemente infectó los brotes de la semilla sembrada (Kromann, Taipei, et al. 2008, 572; Morales 2010, 32); al contrario, a 2700 msnm el cultivo de maíz y los bosques de eucalipto predominan; los lotes de papa son esporádicos y distantes, razones para que el inóculo inicial fuera escaso y le tomara más tiempo desarrollar una epidemia intensa.

La mayor TAI a 2700 msnm se debería a que las mayores temperatura y horas de hoja húmeda, permitirían mayores infección, tasa de crecimiento del micelio (Harrison 1992, 387; 1995, 221), esporulación (Harrison 1995, 221), gran producción de inóculo (Harrison 1992, 394) y sus temperaturas nocturnas (Anexo 7) favorecieran la germinación indirecta de esta gran cantidad de esporangios (Mizubuti y Fry 1998, 837), provocando nueva infección del tejido sano (Harrison 1995, 228). Lo descrito se ha evidenciado también en otros patosistemas (Guy, Grau, y Oplinger 1989, 237). La susceptibilidad de superchola y la ausencia de protección por fungicidas contribuyeron a la intensidad del tizón tardío (Stein y Kirk 2002, 576; Boland et al. 2004, 337).

1.2 Epidemias con fungicidas

Utilizando las epidemias naturales como referencia (Greiner et al. 2019, 46) queda manifiesto que los fungicidas aplicados a intervalos crecientes y fijos inhibieron el tizón tardío de forma general. Se debe puntualizar que este efecto inhibitor es la adición del

efecto de la molécula química activa sobre *P. infestans* más el efecto del clima sobre la molécula química. Esta investigación no discrimino entre ambos efectos.

Las curvas epidemiológicas muestran que los fungicidas retrasaron el inicio y disminuyeron el desarrollo de la epidemia de manera significativa con intervalos cortos de 7 días y escasa con intervalos largos como 14 y 21 días. Este efecto fue superior y muy claro con dimetomorph y menor con fosfito de K y cimoxanil. De igual forma este efecto disminuyó a 2700 msnm. Se debe destacar que en la mayoría de casos un incremento de 7 a 14 días entre dos aplicaciones consecutivas es suficiente para que la epidemia inicie más temprano y el desarrollo de la epidemia aumente en gran medida; especialmente a 2700 msnm (Anexo 8).

La inhibición del desarrollo de la epidemia de tizón tardío es, en términos generales, directamente proporcional a la intensidad de uso de fungicidas (intervalos cortos conllevan uso frecuente por hasta 10 ocasiones y reportan epidemias menos intensas y viceversa). Además, es remarcable que, similarmente a lo sucedido con las epidemias naturales, las epidemias de los tratamientos con fungicida fueron más severas a 2700 msnm que a 3050 msnm. Observando estas curvas epidemiológicas se destaca el dimetomorph aplicado cada 7 días y tanto a 3050 msnm como a 2700 msnm y el fosfito de K aplicado cada 7 días a 3050 msnm, como los tratamientos que inhibieron la epidemia a niveles que sugieren un control del tizón tardío.

2. Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de fungicidas sistémicos

Antes que todo, es indispensable aclarar que las aplicaciones sucesivas de un solo ingrediente activo (hasta por 10 ocasiones en esta investigación) aunque reproduce una práctica actual en ciertas regiones (Arturo Taipe datos no publicados), no refleja un uso técnico y apropiado de los fungicidas. Se procedió de esta forma expresamente con fines experimentales.

Observando las curvas epidemiológicas naturales se intuye que temperaturas promedio más altas (observadas a 2700 msnm) incrementan la velocidad y la severidad de epidemias de tizón tardío; la comparación ortogonal de 3050 msnm versus 2700 msnm confirmó esta intuición ya que tanto la TAI como la severidad fueron mayores a 2700 msnm en dónde se registró una temperatura promedio 2 °C por encima del promedio registrado a 3050 msnm.

Excepto dimetomorph (a diferentes intervalos), los otros fungicidas no exhibieron un claro contraste en la TAI (con las diferentes frecuencias de aplicación). Los tratamientos con TAI más baja también permitieron la mayor reducción de la severidad de tizón tardío. Cuando se discriminó entre 3050 msnm y 2700 msnm el contraste fue claro pues la elevada frecuencia de aplicación a 3050 msnm significó TAI y severidades muy bajas, estadísticamente diferentes y que aumentan, en magnitud y similitud, según la aplicación de fungicidas se tornó esporádica; sin embargo, a 2700 msnm las TAI y la severidad relativa son más altas y similares entre regímenes de aplicación frecuentes y esporádicos (especialmente con fosfito de K y cimoxanil). A pesar de su similitud, las TAI determinaron distintas severidades entre los fungicidas a 3050 msnm. De forma general tanto la TAI como la severidad aumentan mientras la aplicación de fungicidas se haga poco frecuente y este aumento es mayor a 2700 msnm.

La eficiencia del cimoxanil fue, en general, baja; tanto si se lo aplica de manera frecuente o esporádica no logra inhibir la epidemia de tizón tardío en ninguna altitud. Cimoxanil posee limitada actividad sobre la liberación y germinación de zoosporas (infección) (Töfoli et al. 2016, 46), su rápida degradación restringe su eficiencia a pocos días (Mayton et al. 2001), si además consideramos que se utilizó una formulación de grado técnico, sin coadyuvantes que mejoran la eficiencia de versiones comerciales de los fungicidas (adherencia, penetración al follaje) se puede pensar que la protección del tejido foliar fue muy limitada. La escasa persistencia y la poca actividad de cimoxanil sobre los procesos que se potenciaron a 2700 msnm (infección y esporulación), se hacen evidentes con su nula eficiencia, aspecto que ha sido documentado incluso con versiones comerciales (Taïpe, Kromann, y Andrade-Piedra 2017; Schoch 2017) llegando a cuestionarse su uso (Pozo 2015).

El fosfito de K aplicado cada 7 días fue eficiente únicamente a 3050 msnm corroborando así hallazgos anteriores bajo condiciones similares (Romero 2010; Kromann et al. 2012; Pozo 2015). La reducida eficiencia observada con mayores intervalos y temperaturas posiblemente se debe a que su actividad es primordialmente preventiva y sobre la infección temprana (Mueller y Bradley 2008) como se ha reportado previamente (Taïpe, Kromann, y Andrade-Piedra 2017; Schoch 2017). El fosfito de K fue el fungicida más efectivo para el control del tizón tardío de la papa en Corea del Sur, no obstante, este control se redujo al 50 % en otro lugar donde las condiciones de precipitación frecuentes y alta humedad fueron muy favorables para la enfermedad (Hong et al. 2003), sin duda, algo similar se observó en esta investigación si consideramos que

las condiciones (de temperatura y humedad) para el tizón tardío fueron más favorables como lo demuestran las mayores TAI a 2700 msnm expuestas anteriormente. Alternar o mezclar el fosfito de K con fungicidas protectantes (de hecho la mayoría de fungicidas sistémicos comerciales conllevan esta mezcla) y aplicarlos con intervalos de 9 días proporcionaron un buen control del tizón tardío (W. G. Pérez y Forbes 2016), similar al observado a 3050 msnm con aplicaciones cada 7 días.

Dimetomorph interfiere la biosíntesis de la pared celular para bloquear la formación del tubo germinativo en las zoosporas, la germinación directa de los esporangios y el crecimiento micelial pero además su capacidad anti-esporulante le permitiría bloquear la producción de esporangios y la liberación de zoosporas (Erwin y Ribeiro 1996; Schwinn y Margot 1991; Egan, Murray, y Mullins 1995) todo lo cual reduce la carga de inóculo, la TAI y, en último término, la severidad del tizón tardío (Cohen, Baider, y Cohen 1995, 1505; Kuhn et al. 1991). La eficiencia del dimetomorph podría asociarse también con su elevada resistencia al lavado por la precipitación, así se incrementa su persistencia en el follaje ampliando el periodo de protección hasta por 15 días (Cohen, Baider, y Cohen 1995). Aun aplicando dimetomorph 1 día después de la infección mostró un efecto curativo y mejor desempeño (Cohen, Baider, y Cohen 1995). Experimentos utilizando mezclas de dimetomorph con mancozeb o metalaxyl demostraron su efectividad para reducir el tizón tardío del follaje de papa en condiciones de campo (Dowley y O'Sullivan 1996) y también en macetas (P. Sharma 2013). Estos reportes sustentan la eficiencia observada en esta investigación, aunque esta se restringió a intervalos de 7 días y de manera excepcional a 3050 msnm.

Cuando en 2001 dimetomorph ingresó en el mercado, el pre - requisito para su uso fue que debía ser aplicado en combinación con otro ingrediente activo, con un modo de acción complementario, para así alcanzar la adecuada eficiencia que permita su uso regular por los productores (Stein y Kirk 2003, 609); sin embargo, esta investigación se diseñó para evaluar moléculas simples (buscando explorar sus dinámicas y evitar complejas sinergias que resultan de la combinación de varios ingredientes activos) sin la adición de adherentes ni coadyuvantes. La poca eficiencia de cimoxanil (con todos los intervalos) y de fosfito de K y dimetomorph (con intervalos de 14 y 21 días) pudo deberse a que se utilizaron formulaciones con ingredientes activos únicos, con limitada movilidad dentro del follaje y poco efectivos para detener infecciones establecidas.

La capacidad tóxica de los fungicidas detiene o ralentiza una epidemia de tizón tardío y está influenciada por factores como la dosis y la frecuencia de aplicación, su

modo de acción (protectante o sistémico), su distribución, redistribución y degradación en el follaje (influídas por la temperatura del aire y la precipitación) (Holland y Sinclair 2003, 55; Chakraborty, Tiedemann, y Teng 2000); estos últimos han sido muy estudiados pero son difíciles de cuantificar con precisión (Harrison 1995, 230). Los residuos del metalaxyl decrecen mucho del follaje los dos primeros días posteriores a la aplicación (un 90 % desaparece); luego la reducción es lenta y ningún factor ambiental (temperatura del aire, humedad, precipitación) tuvieron un efecto cuantificable; debido a que metalaxyl ingresa al tejido vegetal (por sistemía) y escapa a su efecto (Milgroom, McCulloch, y Fry 1988, 557).

Si la concentración de los residuos de metalaxyl, y la protección del follaje disminuye, principalmente, en función del tiempo desde la aplicación (Milgroom, McCulloch, y Fry 1988, 558), el riesgo del cambio climático, que requiere mayor atención, es la influencia del clima sobre la biología asexual de *P. infestans* que determinan el incremento en la intensidad y severidad de las epidemias de tizón tardío (Kaukoranta 1996, 325). La observación de que temperaturas del aire más cálidas no afectaron la eficiencia de metalaxyl pero si incrementaron la severidad del ataque de *Phytophthora megasperma* y que se requirieron mayores dosis para limitarlo (Guy, Grau, y Oplinger 1989, 238) refuerzan lo mencionado. No obstante, existe la hipótesis generalizada que el cambio climático intensificará la degradación de los fungicidas y reducirá su eficiencia (Delcour, Spanoghe, y Uyttendaele 2015; Hijmans et al. 2000, 5).

El análisis de las epidemias naturales, observadas a 3050 msnm y 2700 msnm, indicaron que las condiciones climáticas (temperatura y humedad relativa), propiciaron o inhibieron, diferentes eventos del ciclo de vida asexual de *P. infestans* (número y viabilidad de propágulos infecciosos, tasa de esporulación etc.) y del desarrollo epidemiológico (carga de inóculo, tasa de infección) (Garrett et al. 2016); el clima también influye en la eliminación de residuos de fungicidas que son repuestos de diferente forma por los intervalos de días entre aplicaciones (Juroszek y Tiedemann 2011, 107). Estas influencias generaron un efecto acumulativo que al final se expresó en la dinámica de la epidemia. La mayor o menor magnitud de este efecto resultó de la interacción con la actividad de un fungicida particular. En este sentido, los tratamientos que mejor inhibieron el tizón tardío fueron dimetomorph y fosfito de K aplicados cada 7 días. Este patrón de inhibición fue, en general, similar a 3050 msnm y 2700 msnm, no obstante, ya se mencionó que a 2700 msnm el clima fue más propicio para multiplicar el inóculo y

favorecer la infección y como consecuencia la magnitud del efecto inhibitor del tizón tardío se redujo hasta 4 veces.

La aplicación de fungicidas cada 7 días mantendría una elevada concentración de ingredientes fungitóxicos en la planta de papa y tendría un efecto casi exclusivo sobre el patógeno y el efecto del clima sobre la molécula sería marginal; conforme se amplía el intervalo hasta los 21 días los efectos se alternarían pasando a ser relevante el efecto del clima sobre la molécula y marginal el efecto de la molécula sobre el patógeno.

Los resultados mostraron que con aplicaciones cada 7 días, la reposición de fungicida es oportuna y suficiente para mantener una concentración adecuada sobre el follaje, capaz de limitar la generación y acumulación de inóculo, la infección y el establecimiento del tizón tardío logrando mantenerlo controlado. Al contrario, extender las aplicaciones (más de 7 días) permite que la concentración de fungicida sobre el follaje quede expuesta a los efectos de varios factores (temperatura del aire, precipitación, viento, degradación física y bioquímica) (Gilligan 2008, 753) por mayor tiempo; en ausencia de una reposición oportuna la concentración disminuye, los residuos son insuficientes, el control es impreciso e incompleto siendo prácticamente imposible restringir el establecimiento, la infección y el crecimiento de la epidemia, que aumenta progresivamente conforme transcurre la estación de cultivo (Barzman et al. 2015, 11), de ahí que todos los fungicidas aplicados cada 14 y 21 días no exhiban control alguno. Mayton et al (2001) reportaron que con epidemias establecidas, los fungicidas evaluados limitaron el tizón tardío, en comparación con plantas que no reciben fungicidas, aunque ninguno de ellos alcanza un control eficiente. Para dimetomorph y fosfito de K específicamente se menciona que cuando se aplica post infección (como sucede con intervalos de 14 y 21 días) son menos eficientes en el control de la enfermedad (Cohen y Gisi 2007, 1282; Mueller y Bradley 2008).

Existen varios estudios que reportan que la severidad del tizón tardío se redujo a medida que se estrechó el intervalo de aplicación de fungicidas (Stein y Kirk 2003, 612; Mayton et al. 2001, 1010; Kankwatsa et al. 2003). Algo similar se observó con todos los fungicidas aquí estudiados, cuya eficiencia para restringir la epidemia fue nula con intervalos de aplicación de 14 días o mayores (Nærstad, Hermansen, y Bjor 2007, 160). Sin embargo, también hay evidencia contraria a lo expuesto pues varias investigaciones mencionan que intervalos de 10 hasta 21 días, restringen (aunque no totalmente) el tizón tardío de la papa y permiten obtener rendimientos y rentabilidad (Kankwatsa et al. 2003, 551; Girma, Ayalew, y Dechassa 2013, 132; Cooke, Clifford, y Holgate 1981, 683)

especialmente combinados con variedades resistentes (Kirk et al. 2001; Nærstad, Hermansen, y Bjor 2007, 164). El origen de esta discrepancia se atribuiría al tipo de producto utilizado, en este y otros estudios, pues ya se mencionó que se evaluó productos con un solo ingrediente activo, mientras en las investigaciones citadas se evaluaron mezclas comerciales (dos o más ingredientes activos con modos de acción complementaria: protectante + sistémico) que usualmente tienen un mejor desempeño.

Los intervalos de aplicación determinarían el inicio y el establecimiento de la epidemia de tizón tardío; la conducta de las curvas de desarrollo y la severidad asociada a estas sustentan esta afirmación. Intervalos cortos fueron los que más retrasaron el inicio y limitaron el establecimiento, consecuentemente el desarrollo y la severidad de la epidemia se minimizó. Con intervalos intermedios (14 días) y largos (21 días) existió un retraso, de pocos días, para el inicio de la epidemia cuyo desarrollo fue mínimo los primeros 2 meses de cultivo, posteriormente la epidemia logra establecerse y se desarrolla sin ninguna restricción alcanzando TAI y severidades elevadas muy similares a las epidemias naturales. En este sentido, se pudo constatar que la ampliación de los intervalos (14 días o más) compromete significativamente el control del tizón tardío (Nærstad, Hermansen, y Bjor 2007, 160). Resultados similares han sido reportados en África tropical en donde el progreso del tizón tardío de la papa y la severidad final fue notablemente menor en las parcelas aplicadas cada 7 días que en las parcelas aplicadas cada 14 o 21 días (Kankwatsa et al. 2003, 546).

Los fungicidas sistémicos evaluados tienen cierta actividad curativa es decir restringen eventos post - infección a través de limitar, principalmente, el crecimiento del micelio en el interior del tejido del hospedero y la esporulación (Judelson y Blanco 2005, 56), aunque no tienen ningún efecto en eventos pre - infección como son la germinación de esporangios, la tasa de infección y la infección en sí misma (Dowley 1991; K. K. Sharma 1992; Schwinn y Margot 1991). Este hecho es clave para explicar el fácil establecimiento de la epidemia, especialmente con intervalos superiores a los 14 días, a través de la alta probabilidad de nuevo ingreso y depósito de propágulos (esporangios) que infectarían el follaje desprotegido (por la insuficiente reposición de fungicida ya explicada).

Un estudio indicó que temperaturas del aire más cálidas reducen la ventana, entre infección y aplicación, preventiva o curativa de cimoxanil, pues para que la aplicación sea efectiva debe realizarse entre 6 h antes y hasta 24 h después de la infección (Mayton et al. 2001); esta sería la razón para que incluso intervalos de 7 días sean poco efectivos

a 2700 msnm. La elevadas TAI, que hacen presuponer altas tasas de esporulación y germinación indirecta, serían otras de las causas de la poca eficiencia del cimoxanil y del dimetomorph (translaminares) a 2700 msnm. Es importante destacar que, considerando lo sucedido con dimetomorph y fosfito de K aplicados cada 7 días, se observó que tratamientos efectivos a 3050 msnm, reducen su efectividad (dimetomorph) hasta llegar a ser nula (fosfito de K) en condiciones más cálidas (2700 msnm). Otra investigación también reportó que el cimoxanil sería más eficiente para controlar el tizón tardío de la papa en temperaturas del aire más frías (Mayton et al. 2001, 1011). Otro aspecto a destacar es que, mientras mayor es la eficiencia del fungicida y la aplicación es frecuente, las severidades del tizón tardío obtenidas son muy contrastantes entre 3050 msnm y 2700 msnm, y siempre la mayor cantidad de enfermedad se presenta a 2700 msnm (cuya temperatura promedio fue 2 °C más alta que a 3050 msnm). Esto podría interpretarse como que el dimetomorph y el fosfito de K exhiben una importante pérdida de eficiencia bajo temperaturas más cálidas.

Este estudio no abordó el papel de la temperatura de aire en la sensibilidad de *P. infestans* a los fungicidas evaluados. Otro estudio, que también adoleció de este aspecto, sugirió que la temperatura del aire es importante en la resistencia cuantitativa del patógeno, la cual se alcanza a través de mecanismos que mantienen baja la concentración intracelular de fungicida (Deising, Reimann, y Pascholati 2008, 288). La temperatura del aire también altera la permeabilidad de la membrana a los fungicidas y la actividad de proteínas que trasladan sustratos (incluidos los fungicidas) a través de la misma, por lo tanto, bajo su temperatura de crecimiento óptima un patógeno sería menos sensible a un fungicida por su capacidad de metabolizar y desintoxicarse del compuesto químico antes de que alcance su sitio de acción (Matthiesen, Ahmad, y Robertson 2015, 590; Matzrafi 2019, 11). Ya se estableció que a 2700 msnm se dieron condiciones de temperatura más adecuadas para el desarrollo óptimo de *P. infestans*, por ende, su menor sensibilidad a los fungicidas se adicionaría a las causas ya discutidas y en conjunto resultarían en las epidemias más severas en este sitio.

Entre las limitaciones de esta investigación está no haber registrado y analizado la radiación solar, la velocidad del viento o la nubosidad. Su carácter exploratorio le permitió enfocarse en la evaluación de la temperatura, la precipitación y la humedad relativa como factores preponderantes para analizar la epidemia de tizón tardío. Si se ha discutido algún factor climático de forma individual ha sido para relevar aspectos que contribuyeron a explicar las epidemias a 3050 msnm y 2700 msnm. Tanto las

interacciones como los factores obviados revisten importancia y se los debería considerar en futuras investigaciones que pretendan profundizar en los hallazgos que se reportan.

3. Simulación de epidemias de tizón tardío de la papa

Los resultados de las simulaciones, con la parametrización incluida, fueron incoherentes. Esto debido a que para simular el efecto de los fungicidas sistémicos (cimoxanil, dimetomorph y fosfito de K) en la epidemia de tizón tardío no fue suficiente con obtener sus parámetros de PI, PL, TCL y TE del linaje local de *Phytophthora infestans* en el genotipo superchola, sino que se requieren modificaciones a la estructura íntegra del modelo LB2004 (Greg Forbes comunicación personal) tarea, complicada y extensa, que no ha sido realizada.

Los fungicidas cimoxanil y dimetomorph actúan inmediatamente después de la infección pero antes que el patógeno colonice profundamente el tejido y empiece a esporular (Tekos 2010, 77). Su eficiencia de campo actual es similar a algunos fungicidas protectantes. Bajo condiciones de campo exhiben una elevada tasa de disipación (Chen et al. 2020, 3160; Shabeer T.P. et al. 2015, 183; Rao et al. 2020, 558) de tal manera que cuando son aplicados esporádicamente (intervalos mayores a 7 días) su eficiencia es baja y similar al de los fungicidas protectantes (Tekos 2010, 78; Peerzada, S., y Bhat 2020; <https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/euroblight/control-strategies/late-blight-fungicide-table/>). Juntos con el fosfito de K, proporcionaron un escaso control del tizón tardío en la mayoría de los tratamientos y por tal razón se decidió realizar la simulación de sus epidemias utilizando LB2004 con las modificaciones al submodelo de fungicidas protectantes validado y utilizado por Blandón Díaz (Blandón-Díaz et al. 2011).

Las simulaciones de epidemias con fungicidas sistémicos de esta investigación solo son un ejercicio didáctico y de ninguna manera se pueden considerar como una validación del sub - modelo fungicidas de LB2004. En tal virtud, la comparación gráfica de las epidemias observadas y simuladas a 3050 msnm y 2700 msnm y las pruebas de CIT y EAT (Andrade-Piedra, Forbes, Shtienberg, et al. 2005, 1420) se los consiga a los anexos (Anexo 15 - Anexo 18).

Si bien no fue posible simular el desempeño observado de los fungicidas sistémicos, si se logró verificar la sensibilidad de LB2004 para simular epidemias naturales a diferente altitud (temperatura). Las simulaciones se realizaron utilizando parámetros de la interacción hospedero-patógeno específicos para la variedad superchola

que reemplazaron los parámetros genéricos con los que Andrade (2005) validó el modelo para las condiciones de los Andes. Las simulaciones con parámetros específicos de superchola fueron mejores que con parámetros genéricos (gráficos no mostrados).

Diferente proporción de inóculo natural inició las epidemias en ambos sitios experimentales y más temprano a 3050 msnm que a 2700 msnm como se explicó en su momento. Estos hechos resultan difíciles de controlar y cuantificar ya que pueden depender del clima y los patrones de uso de la tierra, como la frecuencia, densidad y el manejo del cultivo de papa. LB2004 es relativamente sensible a la cantidad inicial de esporangios que llegan al campo desde fuentes externas (Hijmans et al. 2000, 5) y al efecto de diferentes temperaturas del aire en la epidemia, debido a la incorporación de un PL dependiente de la temperatura del aire y a la incorporación del efecto de la temperatura del aire en las ecuaciones de TCL y de la TE introducidas por Andrade-Piedra (2005, 1192) y en esta investigación se pudo comprobar esta sensibilidad, ya que las epidemias simuladas fueron muy similares a las epidemias naturales observadas en dos sitios con diferente carga de inóculo y temperaturas del aire.

4. Cambio climático y eficiencia de fungicidas

Está claro que la magnitud de la epidemia resulta de las interacciones hospedero-patógeno-medioambiente-fungicidas de complejidad extrema y que requieren mayor investigación. Los resultados de este estudio son una aproximación bastante general al efecto de un clima más cálido sobre la epidemia del tizón tardío de la papa y sobre la eficiencia de algunos fungicidas, su carácter epidemiológico-exploratorio, desarrolla el conocimiento y contribuye a un futuro abordaje de otros temas de investigación.

Los resultados obtenidos constatan que las epidemias de tizón tardío fueron más severas a 2700 msnm (14 °C) que a 3050 msnm (12 °C), que la eficiencia de fungicidas disminuye con intervalos de aplicación mayores a 7 días y que condiciones más cálidas requieren del incremento de la frecuencia de aplicación para obtener un control efectivo y solo en ciertos casos. Algo similar ocurrió con el patosistema *Ustilago nuda* – cebada pues los fungicidas fueron menos eficientes a 15 °C que a 10 °C (Martin y Edgington 1980). Estos hallazgos sugieren potenciales efectos del calentamiento global sobre la eficacia de los fungicidas (Juroszek y Tiedemann 2011, 106).

Temperaturas del aire más elevadas le permiten a *P. infestans* superar ciertas limitaciones naturales y aprovechar condiciones marginales o de corta duración para

desarrollar epidemias (Mizubuti y Fry 1998, 840). Esto supondría una adaptación exitosa de *P. infestans* a variaciones del clima (temperatura del aire y humedad especialmente) durante el ciclo de cultivo así como la reducción de la eficiencia de algunas herramientas de manejo bajo las nuevas condiciones generadas por el calentamiento global que redundaría en un incremento de la incidencia y severidad del tizón tardío (Launay et al. 2014, 148) comprometiendo así, la producción mundial de un alimento importante (Hijmans et al. 2000, 5).

Los riesgos mencionados posiblemente se enfrenten acortando los intervalos de aplicación de fungicidas (Kaukoranta 1996, 325; Chakraborty y Newton 2011, 10) intensificando así, la frecuencia de uso de los fungicidas (Garrett et al. 2016, 332; Mizubuti y Fry 1998, 838). Esta aspersión intensa, ya practicada actualmente en algunas zonas o situaciones, ha demostrado ser peligrosa para la salud humana y ambiental (Larsen, Gaines, y Deschênes 2017), no sostenible y poco rentable (Koli, Bhardwaj, y Mahawer 2019). En la región Andina, la herramienta de apoyo a la decisión para la aplicación de fungicidas (de mano) provee una guía agroecológica (basada en la interpretación del clima, modo de acción y eficiencia de los fungicidas y resistencia genética de la variedad cultivada) para que los productores puedan tomar decisiones mejor informadas para el manejo del tizón tardío (W. G. Pérez et al. 2020); usándola se evitaría el futuro abuso de los fungicidas en los agroecosistemas extremadamente diversos de los países de la zona andina, con poco acceso a conocimiento y tecnología (Kromann 2007, 25).

Considerando la premisa planteada de que el sitio a 3050 msnm represente las temperaturas actuales y que el sitio a 2700 msnm represente un clima con un calentamiento atmosférico futuro y con los resultados reportados, se prevé una elevada intensidad y severidad de futuras epidemias de tizón tardío en concordancia con otros estudios (Garrett et al. 2016, 335). Con futuras epidemias más severas se definen algunos escenarios a tener en cuenta: fungicidas eficientes bajo las condiciones actuales que perderían eficiencia, pero seguirían brindando protección, bajo un clima más cálido (dimetomorph). También está el escenario del cimoxanil cuya escasa eficiencia bajo las condiciones actuales se reduciría aún más (50 % aprox.) en condiciones más cálidas. Fosfito de K representa un escenario más preocupante en el que un fungicida que brinda protección actualmente, en condiciones más cálidas sería totalmente ineficiente pues permitiría epidemias hasta un 75 % más severas. Únicamente intervalos de aplicación

frecuentes (7 días) logran una reposición de la concentración de fungicidas a un nivel que garantizaron la capacidad inhibidora de la epidemia incluso en condiciones más cálidas.

Argumentando con lo mencionado en el párrafo previo se puede decir que ciertos fungicidas e intervalos efectivos bajo un clima actual comprometen su desempeño en un clima futuro. De esta forma se expone objetivamente el riesgo que representa el calentamiento global para las actuales herramientas y enfoques útiles que dejarían de serlo en las próximas décadas (dimetomorph aplicado cada 7 días incrementa 1.5 veces la severidad de tizón tardío en condiciones más cálidas), situación a tomar en cuenta en el futuro manejo del tizón tardío.

Las estrategias de adaptación climática a largo plazo son varias, sin embargo, generar conocimiento para el uso óptimo de fungicidas (periodicidad correcta, incorporando ingredientes activos más eficientes, mejor formulados y de bajo impacto ambiental, diseñando una estrategia con parámetros ecológicos) que garantice el control de epidemias más intensas (pronosticadas con un clima más cálido) (Matzrafi 2019, 12) es la opción más inmediata (Rivera et al. 2014) y la que les permitirá a los agricultores reducir los costos y las pérdidas (Newbery, Qi, y Fitt 2016, 102) contribuyendo también a la mitigación climática mediante la reducción del exceso de insumos y las emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante GEI) innecesarias (Lamichhane et al. 2015, 445; Heeb, Jenner, y Cock 2019, 956).

Aunque la resistencia genética es una excelente estrategia de adaptación al cambio climático (reduce el uso de fungicidas), una realidad que persiste en el Ecuador es que el productor cultiva guiado por el precio y las preferencias de consumo (variedades susceptibles y tardías); además, la vigilancia fitosanitaria es precaria debido a que no es una práctica habitual ni precisa (casi no se la realiza y/o se carece de conocimientos sobre en tizón tardío), también, el acceso a fungicidas obsoletos e ineficientes es extremadamente fácil y económicamente viable. Las razones expuestas hacen pensar que es poco probable que los productores de estas regiones abandonen los esquemas de aplicación calendarizadas y frente a epidemias más severas acentúen el uso de fungicidas poco eficientes y peligrosos.

En torno a lo discutido hasta aquí, es posible vaticinar severas epidemias de tizón tardío de la papa impulsadas por un calentamiento del aire, circundante a la canopia, y por un incremento de las precipitaciones en la zona papera del Ecuador (Andes interiores) (Sanabria y Lhomme 2013). No obstante, la incertidumbre de los pronósticos climáticos es otro aspecto a considerar; para la temperatura del aire son bastante precisos y

aceptados, las proyecciones de la precipitación (por consiguiente, de la humedad ambiental y en la superficie de la hoja) son escasas e imprecisas y trasladan incertidumbre a proyecciones de procesos esenciales como la infección (muy sensible a las variaciones) principal responsable de desencadenar epidemias fúngicas (Launay et al. 2014, 156). Por otro lado, están las numerosas interacciones entre los procesos de los ecosistemas, las influencias humanas, las condiciones ambientales, las poblaciones de patógenos y sus potenciales de adaptación; en otras palabras, hay muchas razones para pensar que las predicciones a largo plazo y con una precisión aceptable (Elad y Pertot 2014, 100), de las enfermedades fungosas (como el tizón tardío de la papa) y sus estrategias de manejo, seguirán siendo particularmente difíciles (Fuhrer 2003, 11; Juroszek y Tiedemann 2011, 108).

Los hallazgos de esta investigación ejemplifican la pronosticada alta imprevisibilidad de las interacciones entre el clima, los cultivos, las enfermedades y su manejo, en áreas andinas extremadamente sensibles, bajo la cual el riesgo de fracaso total de estrategias de protección de cultivos, actuales y futuras, es elevado (Lamichhane et al. 2015, 446; Chakraborty y Newton 2011). Frente a este futuro incierto será necesario desarrollar estrategias de manejo holísticas (es decir abarcando la problemática en su totalidad) en las que no se descarte ningún componente (p. ej. los fungicidas) y sistemas de cultivo resilientes al cambio climático (Sutherst et al. 2011).

Conclusiones

El clima a 2700 msnm fue más cálido, con más horas de hoja húmeda y con mayor variabilidad que a 3050 msnm. Por consiguiente, ciertos eventos del ciclo asexual de *P. infestans* optimizaron el desarrollo de epidemias de tizón tardío en la variedad susceptible superchola a esta altura. Así, la altitud afectó el desarrollo del tizón tardío ajustándose a la premisa planteada para contrastar el desempeño de los fungicidas sistémicos bajo una temperatura actual (12 °C a 3050 msnm) y temperaturas producto del calentamiento global (14 °C a los 2700 msnm).

A 2700 msnm, la epidemia natural de tizón tardío exhibió una mayor TAI ($r = 0.21$) y severidad (ABEDER = 38) y duró 30 días, mientras a 3050 msnm la TAI y la severidad fueron 40 % y 10 % más bajas, respectivamente y la epidemia duró 60 días.

Dimetomorph aplicado cada 7 días retrasó hasta 65 días el inicio y el establecimiento de la epidemia; a 2700 msnm este retraso se redujo un 66 %; dimetomorph, fosfito de K y cimoxanil con regímenes de aplicación de 7 días interfirieron, con mayor éxito, el desarrollo del tizón tardío a 3050 msnm ($r = 0.03$, $r = 0.05$ y $r = 0.08$ respectivamente) sin embargo, este desempeño decae a 2700 msnm incrementando la TAI (267 %, 300 % y 213 % respectivamente); a pesar de este decaimiento dimetomorph y fosfito de potasio con regímenes aplicados cada 7 días exhiben las más bajas severidades tanto a 3050 msnm (ABEDER = 1 y ABEDER = 6 respectivamente) como a 2700 msnm (ABEDER = 5 para dimetomorph); aplicaciones, frecuentes o esporádicas, de fosfito de K y cimoxanil y más esporádicas de dimetomorph apenas retardan el inicio y establecimiento de la epidemia de 10 a 24 días y siempre en menor magnitud a 2700 msnm.

Las más bajas TAI y severidades se obtuvieron con regímenes de aplicación semanales (7 días) de fungicidas eficientes como dimetomorph; regímenes más amplios (14 o 21 días) permitieron TAI y severidades elevadas aún con fungicidas eficientes. La severidad y la TAI son más grandes a 2700 msnm.

El efecto de la temperatura en epidemias naturales fue apropiadamente simulado por LB2004. La simulación con fungicidas produjo resultados diversos, con los tratamientos menos eficientes se logra una buena simulación mientras que con tratamientos muy eficientes LB2004; parametrizado para fungicidas protectantes, sobrestimó la epidemia.

Las incrementadas severidades, por la elevación de la temperatura, sugieren varios escenarios: fungicidas actualmente poco eficientes que pasarían a ser inútiles, fungicidas cuya eficiencia actual se reduciría pero que seguirían siendo opciones válidas y lo más preocupante fungicidas que perderían toda eficacia bajo condiciones más cálidas.

Lista de referencias

- Acuña, Ivette, y Rodrigo Bravo, eds. 2019. *Tizón tardío de la papa: Estrategias de manejo integrado con alertas temprana*. Boletín INIA 399. Osorno, Chile: Instituto de Investigación Agraria.
- Adler, Nicole E., Lynn J. Erselius, María G. Chacón, Wilbert G. Flier, María E. Ordoñez, Laurens P. N. M. Kroon, y Gregory A. Forbes. 2004. "Genetic Diversity of *Phytophthora infestans* Sensus Lato in Ecuador Provides New Insight Into the Origin of This Important Plant Pathogen". *Phytopathology* 94 (2): 154–62. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.2.154>.
- Agrios, George N. 2005. *Plant Pathology*. 5a ed. San Diego, CA: Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02037-6>.
- Andrade-Piedra, Jorge L., Gregory A. Forbes, Dani Shtienberg, Niklaus J. Grünwald, María G. Chacón, Marco V. Taipe, Robert J. Hijmans, y William Fry. 2005. "Qualification of a Plant Disease Simulation Model: Performance of the LATEBLIGHT Model Across a Broad Range of Environments". *Phytopathology* 95 (12): 1412–22. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1412>.
- Andrade-Piedra, Jorge L., Robert J. Hijmans, y Gregory A. Forbes. 2007. "Instructions for the LB2004 Version of LATEBLIGHT". Manuscript. Lima, Perú.
- Andrade-Piedra, Jorge L., Robert J. Hijmans, Gregory A. Forbes, William Fry, y Rebecca J. Nelson. 2005. "Simulation of Potato Late Blight in the Andes. I: Modification and Parameterization of the LATEBLIGHT Model". *Phytopathology* 95 (10): 1191–99. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1191>.
- Andrade-Piedra, Jorge L., Robert J. Hijmans, Henry S. Juárez, Gregory A. Forbes, Dani Shtienberg, y William Fry. 2005. "Simulation of Potato Late Blight in the Andes. II: Validation of the LATEBLIGHT Model". *Phytopathology* 95 (10): 1200–1208. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1200>.
- Andrivon, Didier, Fabian Pilet, Josselin Montarry, Majida Hafidi, Roselyne Corbière, El Hassan Achbani, Roland Pellé, y Daniel Ellissèche. 2007. "Adaptation of *Phytophthora infestans* to Partial Resistance in Potato: Evidence from French and Moroccan Populations". *Phytopathology* 97 (3): 338–43. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-3-0338>.
- Arneson, Phil A. 2011. "Plant Disease Epidemiology: Temporal Aspects". APS/Education/Disease Impacts & Management/Topics. 2011. <https://www.apsnet.org/edcenter/disimpactmngmnt/topc/EpidemiologyTemporal/Pages/default.aspx>.
- Aylor, Donald E., William Fry, Hilary Mayton, y Jorge L. Andrade-Piedra. 2001. "Quantifying the Rate of Release and Escape of *Phytophthora infestans* Sporangia from a Potato Canopy". *Phytopathology* 91 (12): 1189–96. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.12.1189>.
- Barzman, Marco, Jay Ram Lamichhane, Kees Booij, Piet Boonekamp, Nicolas Desneux, Laurent Huber, Per Kudsk, et al. 2015. "Research and Development Priorities in the Face of Climate Change and Rapidly Evolving Pests". En *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 17*, editado por Eric Lichtfouse, 1–27. Sustainable Agriculture Reviews. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16742-8_1.
- Becktell, Margot C., Margery L. Daughtrey, y William Fry. 2005. "Temperature and Leaf Wetness Requirements for Pathogen Establishment, Incubation Period, and

- Sporulation of *Phytophthora infestans* on *Petunia × hybrida*". *Plant Disease* 89 (9): 975–79. <https://doi.org/10.1094/PD-89-0975>.
- Berger, Richard D. 1988. "The Analysis of Effects of Control Measures on the Development of Epidemics". En *Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology*, editado por Jürgen Kranz y Joseph Rotem, 137–51. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95534-1_10.
- Blandón-Díaz, Jorge U., Gregory A. Forbes, Jorge L. Andrade-Piedra, y Jonathan Yuen. 2011. "Assessing the Adequacy of the Simulation Model LATEBLIGHT Under Nicaraguan Conditions". *Plant Disease* 95: 839–46. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0702>.
- Boland, G. J., M. S. Melzer, A. Hopkin, V. Higgins, y A. Nassuth. 2004. "Climate Change and Plant Diseases in Ontario". *Canadian Journal of Plant Pathology* 26 (3): 335–50. <https://doi.org/10.1080/07060660409507151>.
- Börner, Horst. 2009. *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. Springer-Verlag.
- Bruhn, J. A., y William Fry. 1982. "A Mathematical Model of the Spatial and Temporal Dynamics of Chlorothalonil Residues on Potato Foliage". *Phytopathology* 72 (10): 1306–12. <https://doi.org/DOI:10.1094/Phyto-72-1306>.
- Burdon, Jeremy J., y Jiasui Zhan. 2020. "Climate Change and Disease in Plant Communities". *PLOS Biology* 18 (11): 1–7. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000949>.
- Bustos-Cordero, Ana María. 2019. "Ruta de intervención para articular la Gestión Ambiental en el GAD Cantonal de Cuenca". *Universidad del Azuay Casa Editora*, enero. <http://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceazuay/catalog/view/47/44/471-1>.
- Buytaert, Wouter, Rolando Céleri, y Luis Timbe. 2009. "Predicting Climate Change Impacts on Water Resources in the Tropical Andes: Effects of GCM Uncertainty". *Geophysical Research Letters* 36 (7). <https://doi.org/10.1029/2008GL037048>.
- Buytaert, Wouter, Francisco Cuesta, y Conrado Tobón. 2011. "Potential Impacts of Climate Change on the Environmental Services of Humid Tropical Alpine Regions". *Global Ecology and Biogeography* 20 (1): 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>.
- Campbell, Lee C., y L. V. Madden. 1991. *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. New York: John Wiley & Sons.
- Carisse, Odile, Neil McRoberts, y Luc Brodeur. 2008. "Comparison of Monitoring- and Weather-Based Risk Indicators of Botrytis Leaf Blight of Onion and Determination of Action Thresholds". *Canadian Journal of Plant Pathology* 30 (3): 442–56. <https://doi.org/10.1080/07060660809507542>.
- Carvajal, Pablo E., Francis G. N. Li, Rafael Soria, Jennifer Cronin, Gabriel Anandarajah, y Yacob Mulugetta. 2019. "Large Hydropower, Decarbonisation and Climate Change Uncertainty: Modelling Power Sector Pathways for Ecuador". *Energy Strategy Reviews* 23: 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.008>.
- Chacón, María G., Nicole E. Adler, Francisco Jarrín, Wilbert G. Flier, C. Gessler, y Gregory A. Forbes. 2006. "Genetic Structure of the Population of *Phytophthora infestans* Attacking *Solanum ochranthum* in the Highlands of Ecuador". *European Journal of Plant Pathology* 115 (2): 235–45. <https://doi.org/10.1007/s10658-006-9012-9>.
- Chacón, María G., Arturo Taipe, Pedro J. Oyarzún, y Gregory A. Forbes. 2001. "Evaluation of Fungicides for Control of Late Blight in Two Potato Cultivars in

- the Highlands of Ecuador”. Technical report. Quito: Centro Internacional de la Papa.
- Chakraborty, Sukumar. 2013. “Migrate or Evolve: Options for Plant Pathogens under Climate Change”. *Global Change Biology* 19 (7): 1985–2000. <https://doi.org/10.1111/gcb.12205>.
- Chakraborty, Sukumar, J. Luck, G. Hollaway, A. Freeman, R. Norton, K. A. Garrett, K. Percy, A. Hopkins, C. Davis, y D. F. Karnosky. 2008. “Impacts of Global Change on Diseases of Agricultural Crops and Forest Trees”. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 3. <https://findanexpert.unimelb.edu.au/scholarlywork/305249-impacts-of-global-change-on-diseases-of-agricultural-crops-and-forest-trees>.
- Chakraborty, Sukumar, y Adrian C. Newton. 2011. “Climate Change, Plant Diseases and Food Security: An Overview”. *Plant Pathology* 60 (1): 2–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x>.
- Chakraborty, Sukumar, A.V Tiedemann, y P.S Teng. 2000. “Climate Change: Potential Impact on Plant Diseases”. *Environmental Pollution* 108 (3): 317–26. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00210-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00210-9).
- Chen, Xiaochu, Wenzhuo Wang, Fengmao Liu, y Yanli Bian. 2020. “Improved Analysis of Propamocarb and Cymoxanil for the Investigation of Residue Behavior in Two Vegetables with Different Cultivation Conditions”. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100 (7): 3157–63. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10350>.
- Coakley, Stella M., Harald Scherm, y Sukumar Chakraborty. 1999. “Climate Change and Plant Disease Management”. *Annual Review of Phytopathology* 37 (1): 399–426. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.399>.
- Cohen, Yigal, Alexander Baider, y Bat Hen Cohen. 1995. “Dimethomorph Activity against Oomycete Fungal Plant Pathogens”. *Phytopathology* 85 (12): 1500–1506. <https://doi.org/10.1094/Phyto-85-1500>.
- Cohen, Yigal, y Ulrich Gisi. 2007. “Differential Activity of Carboxylic Acid Amide Fungicides Against Various Developmental Stages of *Phytophthora infestans*”. *Phytopathology* 97 (10): 1274–83. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-10-1274>.
- Cooke, Louise R., Derek R. Clifford, y Margaret E. Holgate. 1981. “Control of Potato Late Blight (*Phytophthora infestans*) with Systemic Fungicides”. *Pesticide Science* 12 (6): 678–84. <https://doi.org/10.1002/ps.2780120614>.
- Coronel, Jorge. 2020. “Informe de rendimientos objetivos de papa 2019”. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA). Quito, Ecuador. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/estudios/rendimientos/papa/rendimiento_papa_2019.pdf.
- Crissman, Charles, Donald Cole, y Fernando Carpio. 1994. “Pesticide Use and Farm Worker Health in Ecuadorian Potato Production”. *American Journal of Agricultural Economics* 76 (3): 593–97. <https://doi.org/10.2307/1243670>.
- Crissman, Charles, Patricio Espinosa, Cecile Ducrot, Donald Cole, y Fernando Carpio. 1998. “The Case Study Site: Physical, Health, and Potato Farming Systems in Carchi Province”. En *Economic, Environmental, and Health Tradeoffs in Agriculture: Pesticides and the Sustainability of Andean Potato Production*, editado por Charles Crissman, John Antle, y Susan Capalbo, 85–120. Natural Resource Management and Policy. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, Centro Internacional de la Papa.

- Crosier, Willard. 1934. "Studies in the Biology of *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary". Memoirs 155. Cornell University Agricultural Station. Ithaca, N.Y.: Cornell University. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20057004054>.
- Cruickshank, G., H. E. Stewart, y R. L. Wastie. 1982. "An Illustrated Assessment Key for Foliage Blight of Potatoes". *Potato Res.* 25 (2): 213–14. <https://doi.org/10.1007/BF02359807>.
- Deising, Holger B., Sven Reimann, y Sérgio F. Pascholati. 2008. "Mechanisms and Significance of Fungicide Resistance". *Brazilian Journal of Microbiology* 39: 286–95. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000200017>.
- Delcour, Ilse, Pieter Spanoghe, y Mieke Uyttendaele. 2015. "Literature Review: Impact of Climate Change on Pesticide Use". *Food Research International* 68: 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.09.030>.
- Dent, J. B., y M. J. Blackie. 1979. "Principles of Model-Building". En *Systems Simulation in Agriculture*, editado por J. B. Dent y M. J. Blackie, 1–24. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-6373-6_1.
- Devaux, André, Peter Kromann, y Oscar Ortiz. 2014. "Potatoes for Sustainable Global Food Security". *Potato Research* 57 (3–4): 185–99. <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9265-1>.
- Dowley, L. J. 1991. "Potato Blight Control: A Six-Year Review of Systemic/Protectant Mixtures". Report. Carlow, Ireland: Oak Park Research Centre.
- Dowley, L. J., y E. O'Sullivan. 1996. "The Effect of Dimethomorph on the Control of Late Blight of Potatoes". *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 35 (2): 165–69.
- Eddleston, Michael, Lakshman Karalliedde, Nick Buckley, Ravindra Fernando, Gerard Hutchinson, Geoff Isbister, Flemming Konradsen, et al. 2002. "Pesticide Poisoning in the Developing World — A Minimum Pesticides List". *The Lancet* 360 (9340): 1163–67. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11204-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11204-9).
- Egan, A. R., A. Murray, y S. Mullins. 1995. "Past History and Future Prospects for Fungicides for the Control of *Phytophthora infestans* on Potatoes". En *Phytophthora infestans 150*, editado por L. J. Dowley, E. Bannon, L. R. Cooke, T. Keane, y E. O'Sullivan, 160–70. Dublin, Ireland.: Boole Press Ltd.
- Elad, Yigal, y Ilaria Pertot. 2014. "Climate Change Impacts on Plant Pathogens and Plant Diseases". *Journal of Crop Improvement* 28 (1): 99–139. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.865412>.
- EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2012. "Design and Analysis of Efficacy Evaluation Trials". *EPPO Bulletin* 42 (3): 367–81. <https://doi.org/10.1111/epp.2610>.
- Erazo, Bolívar. 2020. "Representing Past and Future Hydro-Climatic Variability over Multi-Decadal Periods in Poorly-Gauged Regions: The Case of Ecuador". PhD Thesis Dissertation, Toulouse, France: Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <http://thesesups.ups-tlse.fr/4734/>.
- Erwin, D.C, y O.K. Ribeiro. 1996. *Phytophthora Diseases Worldwide*. St. Paul, Minnesota: APS Press.
- FAO, ed. 2015. *Coping with Climate Change: The Roles of Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome: FAO.
- . 2016. "Clima, agricultura y seguridad alimentaria: Estudio detallado de sus conexiones". En *El estado mundial de la agricultura y la alimentación.*, 24–47. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Roma, Italia.
- FAOSTAT. 2017. "Food and Agriculture Data". FAO. 2017. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

- Fones, Helen N., Daniel P. Bebber, Thomas M. Chaloner, William T. Kay, Gero Steinberg, y Sarah J. Gurr. 2020. "Threats to Global Food Security from Emerging Fungal and Oomycete Crop Pathogens". *Nature Food* 1 (6): 332–42. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>.
- Forbes, Gregory A. 2012. "Using Host Resistance to Manage Potato Late Blight with Particular Reference to Developing Countries". *Potato Research* 55 (3–4): 205–16. <https://doi.org/10.1007/s11540-012-9222-9>.
- Forbes, Gregory A., William Fry, Jorge L. Andrade-Piedra, y Dani Shtienberg. 2008. "Simulation Models for Potato Late Blight Management and Ecology". En *Integrated Management of Diseases Caused by Fungi, Phytoplasma and Bacteria*, editado por A. Ciancio y K.G. Mukerji, 161–77. Integrated Management of Plant Pests and Diseases. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8571-0_8.
- Forbes, Gregory A., Niklaus J. Grünwald, Eduardo S. G. Mizubuti, Jorge L. Andrade-Piedra, y Karen A. Garrett. 2007. "Potato Late Blight in Developing Countries". <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/67295>.
- Forbes, Gregory A., y Juan A. Landeo. 2006. "Late Blight". En *Handbook of Potato Production, Improvement, and Postharvest Management*, editado por J. P. Gopal y S. M. Khurana, 1st ed., 279–320. Binghamton, NY: Haworth Press Inc.
- Forbes, Gregory A., Wilmer G. Pérez, y Jorge L. Andrade-Piedra. 2014. "Field Assessment of Resistance in Potato to *Phytophthora infestans*: International Cooperators Guide". International Potato Center (CIP). <https://dx.doi.org/10.4160/9789290604402>.
- Friskop, Andrew, Samuel Markell, y Mohamed Khan. 2021. "North Dakota Field Crop Plant Disease Management Guide". North Dakota State University. <https://www.ag.ndsu.edu/publications/crops/north-dakota-field-crop-plant-disease-management-guide/pp622-21.pdf>.
- Fry, William. 1978. "Quantification of General Resistance of Potato Cultivars and Fungicide Effects for Integrated Control of Potato Late Blight". *Phytopathology* 68 (11): 1650–55. <https://doi.org/10.1094/Phyto-68-1650>.
- . 2008. "*Phytophthora infestans*: The Plant (and R Gene) Destroyer". *Molecular Plant Pathology* 9 (3): 385–402. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00465.x>.
- Fry, William, P. R. J. Birch, H. S. Judelson, N. J. Grünwald, G. Danies, K. L. Everts, A. J. Gevens, et al. 2015. "Five Reasons to Consider *Phytophthora infestans* a Reemerging Pathogen". *Phytopathology* 105 (7): 966–81. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0005-FI>.
- Fry, William, Gregory A. Forbes, Jorge L. Andrade-Piedra, y Dani Shtienberg. 2009. "Late Blight Simulation and Forecasting: Bells and Whistles or Real Tools for Researchers and Farmers?" *Acta Horticulturae*, núm. 834: 69–78. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.834.6>.
- Fuhrer, Jürg. 2003. "Agroecosystem Responses to Combinations of Elevated CO₂, Ozone, and Global Climate Change". *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97 (1–3): 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00125-7).
- Gallegos, Patricio, Germán Ávalos, y Carmen Castillo. 1997. "El gusano blanco de la papa (*Premnotrypes vorax*) en el Ecuador: Comportamiento y control". INIAP.
- Garrett, Karen A., Gregory A. Forbes, L. Gómez, M. A. Gonzáles, M. Gray, P. Skelsey, y A. H. Sparks. 2013. "Cambio climático, enfermedades de las plantas e insectos plaga". En *Cambio climático y adaptación en el Altiplano boliviano*, 1a ed., 71–97. SANREM CRSP. Bolivia: CIDES - UMSA.

- Garrett, Karen A., M. Nita, E.D. De Wolf, P.D. Esker, L. Gomez-Montano, y A.H. Sparks. 2016. "Plant Pathogens as Indicators of Climate Change". En *Climate Change*, 325–38. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00021-X>.
- Ghini, Raquel, Emília Hamada, Francislene Angelotti, Lúcio B. Costa, y Wagner Bettiol. 2012. "Research Approaches, Adaptation Strategies, and Knowledge Gaps Concerning the Impacts of Climate Change on Plant Diseases". *Tropical Plant Pathology* 37 (1): 5–24. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000100002>.
- Gilligan, Christopher A. 2008. "Sustainable Agriculture and Plant Diseases: An Epidemiological Perspective". *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363 (1492): 741–59. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2181>.
- Girma, Fekede, Amare Ayalew, y Nigussie Dechassa. 2013. "Management of Late Blight (*Phytophthora infestans*) of Potato (*Solanum tuberosum*) through Potato Cultivars and Fungicides in Hararghe Highlands, Ethiopia". *International Journal of Life Sciences* 2 (3): 130–38.
- Global Initiative on Late Blight (GILB), y International Potato Center (CIP). 2014. "Social Impact and Economic Importance of Late Blight". What Is Late Blight. 2014. <http://gilb.cip.cgiar.org/what-is-late-blight/economic-impact/social-impact-and-economic-importance-of-late-blight>.
- Grayson, B. Terence, Darren M. Batten, y David Walter. 1996. "Adjuvant Effects on the Therapeutic Control of Potato Late Blight by Dimethomorph Wettable Powder Formulations". *Pesticide Science* 46 (4): 355–59. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199604\)46:4<355::AID-PS364>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199604)46:4<355::AID-PS364>3.0.CO;2-U).
- Greiner, S. D., P. Racca, J. Jung, y A. von Tiedemann. 2019. "Determining and Modelling the Effective Period of Fungicides against Septoria Leaf Blotch in Winter Wheat". *Crop Protection* 117: 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.11.004>.
- Gupta, Satish K., y T. S. Thind. 2018. *Disease Problems in Vegetable Production*. 2a ed. Scientific Publishers.
- Guy, S. O., C. R. Grau, y E. S. Oplinger. 1989. "Effect of Temperature and Soybean Cultivar on Metalaxyl Efficacy against *Phytophthora megasperma* f. Sp. *Glycinea*". *Plant Disease* 73 (3): 236–39. <https://doi.org/10.1094/PD-73-0236>.
- Harrison, J. G. 1992. "Effects of the Aerial Environment on Late Blight of Potato Foliage - a Review". *Plant Pathology* 41 (4): 384–416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1992.tb02435.x>.
- . 1995. "Factors Involved in the Development of Potato Late Blight Disease (*Phytophthora infestans*)". En *Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*, editado por A. J. Haverkort y D. K. L. MacKerron, 3:215–36. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0051-9_14.
- Hartill, W. F. T., K. Young, D. J. Allan, y W. R. Henshall. 1990. "Effects of Temperature and Leaf Wetness on the Potato Late Blight". *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 18 (4): 181–84.
- Hau, B., y J. Kranz. 1990. "Mathematics and Statistics for Analyses in Epidemiology". En *Epidemics of Plant Diseases*, editado por Jürgen Kranz, 13:12–52. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75398-5_2.
- He, Meng-Han, Dong-Liang Li, Wen Zhu, E.-Jiao Wu, Li-Na Yang, Yan-Ping Wang, Abdul Waheed, y Jiasui Zhan. 2018. "Slow and Temperature-Mediated Pathogen

- Adaptation to a Nonspecific Fungicide in Agricultural Ecosystem". *Evolutionary Applications* 11 (2): 182–92. <https://doi.org/10.1111/eva.12526>.
- Heeb, Luca, Emma Jenner, y Matthew J. W. Cock. 2019. "Climate-Smart Pest Management: Building Resilience of Farms and Landscapes to Changing Pest Threats". *Journal of Pest Science* 92 (3): 951–69. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01083-y>.
- Heikkinen, Anna. 2017. "Climate Change in the Peruvian Andes: A Case Study on Small-Scale Farmers' Vulnerability in the Quillcay River Basin". *Iberoamericana – Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies* 46 (1): 77–88. <https://doi.org/10.16993/iberoamericana.211>.
- Henfling, J. W. 1987. "Late Blight of Potato; *Phytophthora infestans*". Technical Information Bulletin 4. Centro Internacional de la Papa (CIP). Lima Perú. 25 pp. Second edition (revised).
- Hernández-Lambrano, Ricardo Enrique, Pablo González-Moreno, y José Ángel Sánchez-Agudo. 2018. "Environmental Factors Associated with the Spatial Distribution of Invasive Plant Pathogens in the Iberian Peninsula: The Case of *Phytophthora cinnamomi* Rands". *Forest Ecology and Management*, Leaf to landscape responses of giant sequoia to hotter drought, 419–420: 101–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.026>.
- Hijmans, Robert J., Niklaus J. Grünwald, R. J. F. van Haren, D. K. L. MacKerron, y H. Scherm. 2000. "Potato Late Blight Simulation for Global Change Research". *GCTE News*, núm. 15: 4–6.
- Holland, Jack, y Phil Sinclair. 2003. "Environmental Fate of Pesticides and the Consequences for Residues in Food and Drinking Water". En *Wiley Series in Agrochemicals and Plant Protection*, editado por Denis Hamilton y Stephen Crossley, 27–62. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470091614.ch2>.
- Hong, Soon-Yeong, Kwang-Seok Lee, Yong-Kil Kang, y Hyeong-Jin Jee. 2003. "Control of Potato Late Blight (*Phytophthora infestans*) with Postassium Phosphonate". *Research in Plant Disease* 9 (3): 179–82. <https://doi.org/10.5423/RPD.2003.9.3.179>.
- INAMHI. 2017. *Anuario Meteorológico 2013*. Editado por J. Olmedo y P. Bracero. Vol. 53. Anuarios Meteorológicos 53–2013. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Instituto de Estadísticas y Censos INEC. 2020. "Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC) 2019". https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Presentacion%20de%20los%20principales%20resultados%20ESPAC%202019.pdf.
- IPCC. 2018. "Summary for Policymakers". En *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, editado por V Masson-Delmotte, P Zhai, H Pörtner, D Roberts, J Skea, P Shukla, A Pirani, et al., In press, 24. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers/>.
- Josse, Carmen, Francisco Cuesta, Gonzalo Navarro, Víctor Barrena, Edersson Cabrera, Eulogio Chacón-Moreno, Wanderley Ferreira, Manuel Peralvo, y Saito A. 2009. *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú*

- y Venezuela. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA - Intercooperation, CONDESAN - Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL.
- Jovovic, Zoran, Branko Micev, y Ana Velimirovic. 2016. "Impact of Climate Change on Potato Production in Montenegro and Options to Mitigate the Adverse Effects". *Academia Journal of Environmental Sciences* 4 (3): 047–054. <https://doi.org/10.15413/ajes.2016.0301>.
- Judelson, Howard S., y Flavio A. Blanco. 2005. "The Spores of *Phytophthora*: Weapons of the Plant Destroyer". *Nature Reviews Microbiology* 3 (1): 47–58. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1064>.
- Juroszek, P., P. Racca, S. Link, J. Farhumand, y B. Kleinhenz. 2020. "Overview on the Review Articles Published during the Past 30 Years Relating to the Potential Climate Change Effects on Plant Pathogens and Crop Disease Risks". *Plant Pathology* 69 (2): 179–93. <https://doi.org/10.1111/ppa.13119>.
- Juroszek, P., y A. von Tiedemann. 2011. "Potential Strategies and Future Requirements for Plant Disease Management under a Changing Climate". *Plant Pathology* 60 (1): 100–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x>.
- . 2013. "Plant Pathogens, Insect Pests and Weeds in a Changing Global Climate: A Review of Approaches, Challenges, Research Gaps, Key Studies and Concepts". *The Journal of Agricultural Science* 151 (2): 163–88. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000500>.
- Kankwatsa, Peace, J.J Hakiza, Modesto Olanya, H.M Kidenamariam, y E Adipala. 2003. "Efficacy of Different Fungicide Spray Schedules for Control of Potato Late Blight in Southwestern Uganda". *Crop Protection* 22 (3): 545–52. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00220-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00220-X).
- Kaukoranta, Timo. 1996. "Impact of Global Warming on Potato Late Blight: Risk, Yield Loss and Control". *Agricultural and Food Science* 5 (3): 311–27. <https://doi.org/10.23986/afsci.72749>.
- King, Steven R. 1987. "Four Endemic Andean Tuber Crops: Promising Food Resources for Agricultural Diversification". *Mountain Research and Development* 7 (1): 43–51. <https://doi.org/10.2307/3673323>.
- Kirk, William W., Kimberly J. Felcher, David S. Douches, Joseph Coombs, J. M. Stein, Kathleen M. Baker, y Ray Hammerschmidt. 2001. "Effect of Host Plant Resistance and Reduced Rates and Frequencies of Fungicide Application to Control Potato Late Blight". *Plant Disease* 85 (10): 1113–18.
- Knapp, G. 1991. *Andean Ecology. Adaptive Dynamics in Ecuador*. Dellplain Latin American Studies Series N° 27. Boulder, CO: West view Press.
- Koli, Pushpendra, Nitish Rattan Bhardwaj, y Sonu Kumar Mahawer. 2019. "Chapter 4 - Agrochemicals: Harmful and Beneficial Effects of Climate Changing Scenarios". En *Climate Change and Agricultural Ecosystems*, editado por Krishna Kumar Choudhary, Ajay Kumar, y Amit Kishore Singh, 65–94. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00004-9>.
- Kranz, J. 1990. "Epidemics, Their Mathematical Analysis and Modeling: An Introduction". En *Epidemics of Plant Diseases*, editado por Jürgen Kranz, 13:1–11. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75398-5_1.
- Kromann, Peter. 2007. "Improving Potato Late Blight Control Strategies for Resource-Poor Farmers in Low in-put Agriculture in Andean Ecuador". PhD Thesis Dissertation, Copenhagen, Denmark: University of Copenhagen.

- Kromann, Peter, Diego León, Arturo Taípe, Jorge L. Andrade-Piedra, y Gregory A. Forbes. 2008. "Comparison of Two Strategies for Use of Translaminar and Contact Fungicide in the Control of Potato Late Blight in the Highland Tropics of Ecuador". *Crop Protection* 27 (7): 1098–1104. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.01.006>.
- Kromann, Peter, Thomas Miethbauer, Oscar Ortiz, y Gregory A. Forbes. 2014. "Review of Potato Biotic Constraints and Experiences with Integrated Pest Management Interventions". En *Integrated Pest Management*, editado por David Pimentel y Rajinder Peshin, 245–68. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_10.
- Kromann, Peter, Willmer G. Pérez, Arturo Taípe, Elmar Schulte-Geldermann, Buddhi Prakash Sharma, Jorge L. Andrade-Piedra, y Gregory A. Forbes. 2012. "Use of Phosphonate to Manage Foliar Potato Late Blight in Developing Countries". *Plant Disease* 96 (7): 1008–15. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-11-1029-RE>.
- Kromann, Peter, Willy Pradel, Donald Cole, Arturo Taípe, y Gregory A. Forbes. 2011. "Use of the Environmental Impact Quotient to Estimate Health and Environmental Impacts of Pesticide Usage in Peruvian and Ecuadorian Potato Production". *Journal of Environmental Protection* 02 (05): 581–91. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.25067>.
- Kromann, Peter, Arturo Taípe, Jorge L. Andrade-Piedra, y Gregory A. Forbes. 2007. "Simulation of Potato Late Blight: Parameterization of the LATEBLIGHT Model with Cultivar-Specific Epidemic Parameters". PhD Thesis Dissertation section. Quito, Ecuador.
- Kromann, Peter, Arturo Taípe, Jorge L. Andrade-Piedra, Lisa Munk, y Gregory A. Forbes. 2008. "Preemergence Infection of Potato Sprouts by *Phytophthora infestans* in the Highland Tropics of Ecuador". *Plant Disease* 92 (4): 569–74. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-4-0569>.
- Kuhn, Paul J., Dennis Pitt, Susan A. Lee, Gavin Wakley, y Alexis N. Sheppard. 1991. "Effects of Dimethomorph on the Morphology and Ultrastructure of *Phytophthora*". *Mycological Research* 95 (3): 333–40. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)81244-6](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)81244-6).
- Lal, Mehi, Saurabh Yadav, y Bibhu Prasad Singh. 2017. "Efficacy of New Fungicides against Late Blight of Potato in Subtropical Plains of India". *Journal of Pure and Applied Microbiology* 11 (1): 599–603. <https://doi.org/10.22207/JPAM.11.1.78>.
- Lamichhane, Jay Ram, Marco Barzman, Kees Booij, Piet Boonekamp, Nicolas Desneux, Laurent Huber, Per Kudsk, et al. 2015. "Robust Cropping Systems to Tackle Pests under Climate Change. A Review". *Agronomy for Sustainable Development* 35 (2): 443–59. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0275-9>.
- Latin, Richard. 2017. "CHAPTER 2: Modes of Action of Fungicides". En *A Practical Guide to Turfgrass Fungicides*, editado por Richard Latin, 27–47. Mycology. The American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/9780890544976.002>.
- Launay, Marie, Julie Caubel, Gaétan Bourgeois, Frédéric Huard, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Marie-Odile Bancal, y Nadine Brisson. 2014. "Climatic Indicators for Crop Infection Risk: Application to Climate Change Impacts on Five Major Foliar Fungal Diseases in Northern France". *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197: 147–58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020>.
- Little, Thomas Morton, y Frederick Jackson Hills. 1979. *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. 2da reimpresión. México D. F.: Trillas.

- López, Héctor Achicanoy. 2000. "Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas". *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 53 (1): 941–68.
- Lutaladio, NeBambi, y Luigi Castaldi. 2009. "Potato: The Hidden Treasure". *Journal of Food Composition and Analysis*, International Year of the Potato, 22 (6): 491–93. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.05.002>.
- Malhi, Yadvinder, Janet Franklin, Nathalie Seddon, Martin Solan, Monica G. Turner, Christopher B. Field, y Nancy Knowlton. 2020. "Climate Change and Ecosystems: Threats, Opportunities and Solutions". *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 375 (1794): 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>.
- Malhi, Yadvinder, y James Wright. 2004. "Spatial Patterns and Recent Trends in the Climate of Tropical Rainforest Regions". Editado por Y. Malhi y O. L. Phillips. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359 (1443): 311–29. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1433>.
- Mariette, Nicolas, Annabelle Androdias, Romain Mabon, Roselyne Corbière, Bruno Marquer, Josselin Montarry, y Didier Andrivon. 2016. "Local Adaptation to Temperature in Populations and Clonal Lineages of the Irish Potato Famine Pathogen *Phytophthora infestans*". *Ecology and Evolution* 6 (17): 6320–31. <https://doi.org/10.1002/ece3.2282>.
- Martin, Richard A., y L. V. Edgington. 1980. "Effect of Temperature on Efficacy of Triadimenol and Fenapanil to Control Loose Smut of Barley". *Canadian Journal of Plant Pathology* 2 (4): 201–4. <https://doi.org/10.1080/07060668009501409>.
- Matthiesen, R. L., A. A. Ahmad, y A. E. Robertson. 2015. "Temperature Affects Aggressiveness and Fungicide Sensitivity of Four *Pythium* Spp. That Cause Soybean and Corn Damping Off in Iowa". *Plant Disease* 100 (3): 583–91. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-15-0487-RE>.
- Matzrafi, Maor. 2019. "Climate Change Exacerbates Pest Damage through Reduced Pesticide Efficacy: Reduced Pesticide Efficacy under Climate Change". *Pest Management Science* 75 (1): 9–13. <https://doi.org/10.1002/ps.5121>.
- Mayton, Hilary, Gregory A. Forbes, Eduardo S. G. Mizubuti, y William Fry. 2001. "The Roles of Three Fungicides in the Epidemiology of Potato Late Blight". *Plant Disease* 85 (9): 1006–12. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.9.1006>.
- Milgroom, M. G., C. E. McCulloch, y William Fry. 1988. "Distribution and Temporal Dynamics of Metalaxyl in Potato Foliage". *Phytopathology* 78 (5): 555–59.
- Mitchell, Peter L. 1997. "Misuse of Regression for Empirical Validation of Models". *Agricultural Systems* 54 (3): 313–26. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(96\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(96)00077-7).
- Mizubuti, Eduardo S. G., Donald E. Aylor, y William Fry. 2000. "Survival of *Phytophthora infestans* Sporangia Exposed to Solar Radiation". *Phytopathology* 90 (1): 78–84. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.1.78>.
- Mizubuti, Eduardo S. G., y William Fry. 1998. "Temperature Effects on Developmental Stages of Isolates from Three Clonal Lineages of *Phytophthora infestans*". *Phytopathology* 88 (8): 837–43. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.8.837>.
- Morales, Washington. 2010. "Estudio de la relación de la concentración e infección de esporangios de *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary en la preemergencia de papa *Solanum tuberosum*. Cutuglahua, Pichincha". Tesis de ingeniero Agrónomo, Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas.
- Mueller, D., y C. Bradley. 2008. "Field crop fungicides for the north Central United States". North Central IPM Center. 2008. <https://www.ncipmc.org/action/pestguides.php>.

- Myhre, Gunnar, Drew Shindell, François-Marie Bréon, William Collins, Jan Fuglestad, Jianping Huang, Dorothy Koch, et al. 2013. "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing". En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por T. F. Stocker, D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y P. M. Midgley, 82. NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Nærstad, R., A. Hermansen, y T. Bjor. 2007. "Exploiting Host Resistance to Reduce the Use of Fungicides to Control Potato Late Blight". *Plant Pathology* 56 (1): 156–66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01491.x>.
- Nair, Kodoth Prabhakaran. 2019. *Combating Global Warming: The Role of Crop Wild Relatives for Food Security*. Springer Climate. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23037-1>.
- Nelson, Rebecca, Ricardo Orrego, Oscar Ortiz, José Tenorio, Christopher Mundt, Marjon Fredrix, y Ngo Vinh Vien. 2001. "Working with Resource-Poor Farmers to Manage Plant Diseases". *Plant Disease* 85 (7): 684–95. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.7.684>.
- Newbery, Fay, Aiming Qi, y Bruce DL Fitt. 2016. "Modelling Impacts of Climate Change on Arable Crop Diseases: Progress, Challenges and Applications". *Current Opinion in Plant Biology, Biotic interactions*, 32: 101–9. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.07.002>.
- Noyes, Pamela D., Matthew K. McElwee, Hilary D. Miller, Bryan W. Clark, Lindsey A. Van Tiem, Kia C. Walcott, Kyle N. Erwin, y Edward D. Levin. 2009. "The Toxicology of Climate Change: Environmental Contaminants in a Warming World". *Environment International* 35 (6): 971–86. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.02.006>.
- Olanya, Modesto, E. Adipala, J.J. Hakiza, Peter Ojiambo, J.M. Mujalazi, Gregory Forbes, y Rebecca Nelson. 2001. "Epidemiology and Population Dynamics of *Phytophthora infestans* in Sub-Saharan Africa: Progress and Constraints". *African Crop Science Journal* 9 (1): 185–93. <https://doi.org/10.4314/acsj.v9i1.27638>.
- Ortiz, Oscar, y Gregory A. Forbes. 2003. "Farmers' Knowledge and Practices Regarding Fungicide Use for Late Blight Control in the Andes". En *Proceedings of the International Workshop Complementing Resistance to Late Blight *Phytophthora infestans* in the Andes, February 13-16, 2001*, editado por Enrique N. Fernandez-Northcote, 45–56. Cochabamba, Bolivia: International Potato Center (CIP).
- Ortiz, Oscar, Karen A. Garrett, Jeremy J. Health, Ricardo Orrego, y Rebecca J. Nelson. 2004. "Management of Potato Late Blight in the Peruvian Highlands: Evaluating the Benefits of Farmer Field Schools and Farmer Participatory Research". *Plant Disease* 88 (5): 565–71. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.5.565>.
- Oyarzún, Pedro J., Patricio Gallegos, César Asaquibay, Gregory A. Forbes, José Ochoa, Betty Paucar, M. Prado, Jorge Revelo, Stephen Sherwood, y Fausto Yumisaca. 2002. "Manejo Integrado de plagas y enfermedades". En *El cultivo de papa en Ecuador*, editado por Manuel Pumisacho y Stephen Sherwood, 85–169. Quito - Ecuador.
- Oyarzún, Pedro J., Carla D. Garzón, Diego León, Irina Andrade, y Gregory A. Forbes. 2005. "Incidence of Potato Tuber Blight in Ecuador". *American Journal of Potato Research* 82 (2): 117–22. <https://doi.org/10.1007/BF02853648>.
- Oyarzún, Pedro J., Arturo Taípe, y Gregory A. Forbes. 2001. "*Phytophthora infestans* Characteristics and Activity in Ecuador—Country Profile". En *Proceedings of the*

- International Workshop Complementing Resistance to Late Blight (Phytophthora infestans) in the Andes, February 13-16, 2001*, editado por Enrique N. Fernandez-Northcote, 15–25. Cochabamba, Bolivia: International Potato Center (CIP).
- Paz, Jorge, Manuel del Jesús, Rafael Kelman, Salvador Navas, Lucas Okamura, y Efrén Feliu. 2019. *Vulnerabilidad al Cambio Climático y Medidas de Adaptación de los Sistemas Hidroeléctricos en los Países Andinos*. Editado por Juan Paredes y Fabio García. Nota técnica del BID, IDB-TN-01781. New York: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Peerzada, S, Viswanath S., y Khurshid Bhat. 2020. “In-Vitro Studies on the Effect of Fungicides against Mycelial Growth and Sporangial Germination of *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary Causing Late Blight of Potato”. *International Journal of Chemical Sciences* 8: 2069–75. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1ae.8569>.
- Pérez, Carlos, Claire Nicklin, Olivier Dangles, Steven Vanek, Stephen Sherwood, Stephan Halloy, Karen A. Garrett, y Gregory A. Forbes. 2010. “Climate Change in the High Andes: Implications and Adaptation Strategies for Small-Scale Farmers”. *The International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability: Annual Review, Sustainability*, 6 (5): 71–88. <https://doi.org/10.18848/1832-2077/CGP/v06i05/54835>.
- Pérez, Willmer G., Rolando Arias, Arturo Taipe, Oscar Ortiz, Gregory A. Forbes, Jorge L. Andrade-Piedra, y Peter Kromann. 2020. “A Simple, Hand-Held Decision Support Designed Tool to Help Resource-Poor Farmers Improve Potato Late Blight Management”. *Crop Protection* 134: 105186. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105186>.
- Pérez, Willmer G., y Gregory A. Forbes. 2008. *Manual técnico. El tizón tardío de la papa*. Lima, Perú: International Potato Center - CIP.
- . 2016. “Control of Potato Late Blight with Foliar Application of Phosphonate”. En *15th Triennial ISTRC Symposium. Tropical Roots and Tubers in a Changing Climate: A Critical Opportunity for the World*, 44–48. Lima, Perú: International Society for Tropical Root Crops (ISTRC). http://www.researchgate.net/profile/Gregory_Forbes/publication/266221108_Control_of_potato_late_blight_with_foliar_application_of_phosphonate/links/54b898ef0cf269d8cbf6ebd0.pdf.
- Phillips, Jade, Joana Magos Brehm, Bob van Oort, Åsmund Asdal, Morten Rasmussen, y Nigel Maxted. 2017. “Climate Change and National Crop Wild Relative Conservation Planning”. *Ambio* 46 (6): 630–43. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0905-y>.
- Pozo, Manuel. 2015. “Evaluación de la efectividad de estrategias convencionales y alternativas para el manejo del tizón tardío *Phytophthora infestans* Mont (de Bary) en papa *Solanum tuberosum*”. Tesis de ingeniero Agrónomo, Quito - Ecuador: Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7392/1/T-UCE-0004-45.pdf>.
- Qin, Chun-Fang, Meng-Han He, Feng-Ping Chen, Wen Zhu, Li-Na Yang, E.-Jiao Wu, Zheng-Liang Guo, Li-Ping Shang, y Jiasui Zhan. 2016. “Comparative Analyses of Fungicide Sensitivity and SSR Marker Variations Indicate a Low Risk of Developing Azoxystrobin Resistance in *Phytophthora infestans*”. *Scientific Reports* 6 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep20483>.
- Rao, Jifa, Ling Chen, Yujia Xiang, Jiayu Li, Xiao Chen, y Yaoyu Zhou. 2020. “Dissipation Behavior and Residue Distribution of Famoxadone and Cymoxanil

- in Cucumber and Soil Ecosystem Under Open-Field Conditions”. *Water, Air, & Soil Pollution* 231 (558): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04907-1>.
- Raymundo, Rubí, Senthold Asseng, Richard Robertson, Athanasios Petsakos, Gerrit Hoogenboom, Roberto Quiroz, Guy Hareau, y Joost Wolf. 2018. “Climate Change Impact on Global Potato Production”. *European Journal of Agronomy*, Recent advances in crop modelling to support sustainable agricultural production and food security under global change, 100: 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008>.
- Reinoso, Iván. 2013. “El cultivo de papa y su participación en la economía ecuatoriana”. Institucional. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. 2013. <http://www.iniap.gob.ec>.
- Ristaino, Jean Beagle. 2002. “Tracking Historic Migrations of the Irish Potato Famine Pathogen, *Phytophthora infestans*”. *Microbes and Infection* 4 (13): 1369–77. [https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)00010-2).
- Rivera, José Mauricio, Judith K. Brown, Stephen Weller, y José C. Melgar. 2014. *Consideraciones técnicas para el efectivo manejo integrado del tizón tardío en papa*. 1ra ed. Protección Vegetal: Conociendo y combatiendo los enemigos de los cultivos. La Lima, Cortés, Honduras, C.A.: Centro de Comunicación Agrícola de la FHIA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola).
- Romero, Jorge. 2010. “Inductores químicos y biológicos de resistencia para el control de *Phytophthora infestans* en papa cultivar Yungay”. Tesis de Magister Scientieae, Lima - Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Post-Grado. Especialidad de Fitopatología.
- Roos, Jonas, Richard Hopkins, Anders Kvarnheden, y Christina Dixelius. 2011. “The Impact of Global Warming on Plant Diseases and Insect Vectors in Sweden”. *European Journal of Plant Pathology* 129 (1): 9–19. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9692-z>.
- Sahagún-Castellanos, J., A. Martínez-Garza, y J. Rodríguez-Pérez. 2008. “Problemas y métodos comunes del análisis de experimentos factoriales”. *Revista Chapingo, Horticultura*, 14 (2): 213–22.
- Salinari, F., S. Giosuè, F. Tubiello, A. Rettori, Rossi Rossi, F. Spanna, C. Rosenzweig, y M. Gullino. 2006. “Downy Mildew (*Plasmopara viticola*) Epidemics on Grapevine under Climate Change”. *Global Change Biology* 12 (7): 1299–1307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x>.
- Samoucha, Y., y Ueli Gisi. 1987. “Systemicity and Persistence of Cymoxanil in Mixture with Oxadixyl and Mancozeb against *Phytophthora infestans* and *Plasmopara viticola*”. *Crop Protection* 6 (6): 393–98. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(87\)90073-1](https://doi.org/10.1016/0261-2194(87)90073-1).
- Sanabria, J., y J. P. Lhomme. 2013. “Climate Change and Potato Cropping in the Peruvian Altiplano”. *Theoretical and Applied Climatology* 112 (3–4): 683–95. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0764-1>.
- SAS Institute Inc., 2019. *SAS/STAT® 15.1 User’s Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sayre, Matthew, Tammy Stenner, y Alejandro Argumedo. 2017. “You Can’t Grow Potatoes in the Sky: Building Resilience in the Face of Climate Change in the Potato Park of Cuzco, Peru”. *Culture, Agriculture, Food and Environment* 39 (2): 100–108. <https://doi.org/10.1111/cuag.12100>.
- Schoch, Kevin. 2017. “Integrated Management of Potato Late Blight in Ecuador”. Bachelor’s thesis, Bern, Switzerland: Bern University of Applied Sciences School of Agricultural, Forest and Food Sciences HAFL Major International Agriculture.

- Schwinn, F. J., y P. Margot. 1991. "Control with Chemicals". En *Advances in Plant Pathology. Phytophthora infestans, the Cause of Late Blight of Potato*, editado por D. S. Ingram y P. H. Williams, 225–65. 7. San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Shabeer T.P., Ahammed, Kaushik Banerjee, Manjusha Jadhav, Rushali Girame, Sagar Utture, Sandip Hingmire, y Dasharath Oulkar. 2015. "Residue Dissipation and Processing Factor for Dimethomorph, Famoxadone and Cymoxanil during Raisin Preparation". *Food Chemistry* 170: 180–85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.008>.
- Shailbala, Shailbala, y Amarendra Kumar. 2017. "Eco-Friendly Management of Late Blight of Potato— A Review". *Journal of Applied and Natural Science* 9 (2): 821–35. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i2.1282>.
- Shakya, Shankar. K., Erica M. Goss, Nick S. Dufault, y Ariena H. C. van Bruggen. 2015. "Potential Effects of Diurnal Temperature Oscillations on Potato Late Blight with Special Reference to Climate Change". *Phytopathology* 105 (2): 230–38. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-14-0132-R>.
- Shannon, Robert. 1975. *Systems Simulation: The Art and Science*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice-Hall International, Inc.
- Sharma, K. K. 1992. "Control of Potato Late Blight with Systemic and Contact Fungicidal Mixtures in North West Indian Plains". *Journal of the Indian Potato Association (JIPA)* 19 (1/2): 75–76.
- Sharma, Pranamika. 2013. "Management of Late Blight of Potato through Chemicals". *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science* 2 (2): 23–26. <https://doi.org/10.9790/2380-0222326>.
- Shtienberg, Dani, M. A. Doster, J. R. Pelletier, y William Fry. 1989. "Use of Simulation Models to Develop a Low-Risk Strategy to Suppress Early and Late Blight in Potato Foliage". *Phytopathology* 79 (5): 590–95. <https://doi.org/10.1094/Phyto-79-590>.
- Simko, Ivan, y Hans-Peter Piepho. 2011. "The Area Under the Disease Progress Stairs: Calculation, Advantage, and Application". *Phytopatholog* 102 (4): 381–89. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-11-0216>.
- Snedecor, George Waddel, y William Gemmell Cochran. 1967. *Statistical Methods*. Iowa State University Press.
- Spooner, David M., Karen McLean, Gavin Ramsay, Robbie Waugh, y Glenn J. Bryan. 2005. "A Single Domestication for Potato Based on Multilocus Amplified Fragment Length Polymorphism Genotyping". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 (41): 14694–99. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507400102>.
- Stein, Jeffrey M, y William W Kirk. 2002. "Containment of Existing Potato Late Blight (*Phytophthora infestans*) Foliar Epidemics with Fungicides". *Crop Protection* 21 (7): 575–82. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(01\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(01)00147-8).
- . 2003. "Field Optimization of Dimethomorph for the Control of Potato Late Blight *Phytophthora infestans*: Application Rate, Interval, and Mixtures". *Crop Protection* 22 (4): 609–14. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00243-0](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00243-0).
- Stoll, W, G. H. J. De Koning, P. L. Kooman, A. J. Haverkort, H. Keulen, y F. W. T. Penning de Vries. 1991. "Agro-Ecological Characterization for Potato Production. A Simulation Study at the Request of International Potato Center (CIP), Lima, Perú". Wageningen, Netherlands: Center for Agrobiological Research (CABO-DLO).

- Sutherst, Robert W., Fiona Constable, Kyla J. Finlay, Richard Harrington, Jo Luck, y Myron P. Zalucki. 2011. "Adapting to Crop Pest and Pathogen Risks under a Changing Climate". *WIREs Climate Change* 2 (2): 220–37. <https://doi.org/10.1002/wcc.102>.
- Taípe, Arturo, Peter Kromann, y Jorge L. Andrade-Piedra. 2017. "Eficiencia de nuevos fungicidas para el control del tizón tardío de la papa". En *Memorias del VII Congreso Ecuatoriano de la Papa*, 77–78. Tulcán, Ecuador: Centro Internacional de la Papa.
- Tekos, P. 2010. "Investigation of Potato Late Blight Control Strategies in Southwestern Greece: Potential and Suitability of a Decision Support System". MsC Thesis, Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University. Wageningen University & Research - Library. <https://edepot.wur.nl/137719>.
- Tito, Richard, Heraldo L. Vasconcelos, y Kenneth J. Feeley. 2018. "Global Climate Change Increases Risk of Crop Yield Losses and Food Insecurity in the Tropical Andes". *Global Change Biology* 24 (2): e592–602. <https://doi.org/10.1111/gcb.13959>.
- Töfoli, Jesus Guerino, Paulo Cesar Tavares De Melo, Ricardo José Domingues, y Josiane Takassaki Ferrari. 2016. "Controle da requeima e pinta preta da batata por fungicidas e seu reflexo sobre a produtividade e a qualidade de tubérculos". *Arquivos do Instituto Biológico* 83. <https://doi.org/10.1590/1808-1657001172013>.
- Unda, José, Geovanni Suquillo, Carlos Sevillano, Manuel Pumisacho, José Ochoa, y Victor Barrera. 2013. "Diagnóstico del manejo del tizón tardío en la provincia del Carchi, Ecuador". En *Memorias del V Congreso Ecuatoriano de la Papa*, 41–42. Riobamba, Ecuador. <http://www.congresodelapapa.com/>.
- United Nations, Centro Internacional De La Papa, y FAO. 2009. *International Year of the Potato 2008: New Light on a Hidden Treasure. An End of Year Review*.
- Urrutia, Rocío, y Mathias Vuille. 2009. "Climate Change Projections for the Tropical Andes Using a Regional Climate Model: Temperature and Precipitation Simulations for the End of the 21st Century". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114 (D2): 15. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>.
- US EPA, OCSPP. 2014. "Pesticide Volatilization". Other Policies and Guidance. US EPA. el 1 de agosto de 2014. <https://www.epa.gov/reducing-pesticide-drift/pesticide-volatilization>.
- Van der Hammen, Thomas, y Henry Hooghiemstra. 2000. "Neogene and Quaternary History of Vegetation, Climate, and Plant Diversity in Amazonia". *Quaternary Science Reviews* 19 (8): 725–42. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00024-4).
- Van der Plank, J. E. 1963. *Plant Diseases: Epidemics and Control*. New York, USA: Academic Press.
- Van Haren, R.J.F., y D. M. Jansen. 2003. "LINBAL, Light INterception By Active Leaflayers: Description and Application of a Late Blight Limited Potato Growth Model for the Andean Ecoregion". En *Proceedings of the Seventh Workshop of an European Network on Integrated Control of Potato Late Blight*, editado por C E Westerdijk y H.T.A.M. Schepers, 133–78. PPO-Special Report 9. Poznan, Poland. 2-6 October 2002: Wageningen, NL: Applied Plant Research.
- Van Oijen, M. 1991. "Identification of the Major Characteristics of Potato Cultivars Which Affect Yield Loss Caused by Late Blight". En *Components of Resistance to Phytophthora Infestans in Potato: A Review of Literature*. PhD Dissertation. Chapter 4. Wageningen, The Netherlands.

- Viguera, Bárbara, M- Ruth Martínez-Rodríguez, Camila I. Donatti, Celia Harvey, y Francisco Alpizar. 2017. *El clima, el cambio climático, la vulnerabilidad y acciones contra el cambio climático: Conceptos básicos*. Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CASCADA, Módulo 1. Turrialba, Costa Rica: Conservación Internacional, CATIE.
- Vuille, Mathias, Mark Carey, Christian Huggel, Wouter Buytaert, Antoine Rabatel, Dean Jacobsen, Alvaro Soruco, et al. 2018. "Rapid Decline of Snow and Ice in the Tropical Andes – Impacts, Uncertainties and Challenges Ahead". *Earth-Science Reviews* 176: 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.
- Vuille, Mathias, Bernard Francou, Patrick Wagnon, Irmgard Juen, Georg Kaser, Bryan G. Mark, y Raymond S. Bradley. 2008. "Climate Change and Tropical Andean Glaciers: Past, Present and Future". *Earth-Science Reviews* 89 (3): 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>.
- Wesseling, Catharina, Marianela Corriols, y Viria Bravo. 2005. "Acute Pesticide Poisoning and Pesticide Registration in Central America". *Toxicology and Applied Pharmacology*, Living in a Safe Chemical World. Proceedings of the 10th International Congress of Toxicology 11-15 July, 2004, Tampere, Finland, 207 (2, Supplement): 697–705. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.03.033>.
- Wu, E.-Jiao, Yan-Ping Wang, Lurwanu Yahuza, Meng-Han He, Dan-Li Sun, Yan-Mei Huang, Yu-Chan Liu, Li-Na Yang, Wen Zhu, y Jiasui Zhan. 2020. "Rapid Adaptation of the Irish Potato Famine Pathogen *Phytophthora infestans* to Changing Temperature". *Evolutionary Applications* 13 (4): 768–80. <https://doi.org/10.1111/eva.12899>.
- Yang, Li-Na, Wen Zhu, E.-Jiao Wu, Ce Yang, Peter H. Thrall, Jeremy J. Burdon, Li-Ping Jin, Li-Ping Shang, y Jiasui Zhan. 2016. "Trade-Offs and Evolution of Thermal Adaptation in the Irish Potato Famine Pathogen *Phytophthora infestans*". *Molecular Ecology* 25 (16): 4047–58. <https://doi.org/10.1111/mec.13727>.
- Yanggen, David, Donald Cole, Charles Crissman, y Stephen Sherwood. 2004. "Pesticide Use in Commercial Potato Production: Reflections on Research and Intervention Efforts Towards Greater Ecosystems Health in Northern Ecuador". *EcoHealth* 1 (S2): SU72–83. <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0056-z>.
- Zadoks, J. C., y R. D. Schein. 1979. *Epidemiology and Plant Disease Management*. Oxford University Press Inc. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19801361394>.

Anexos

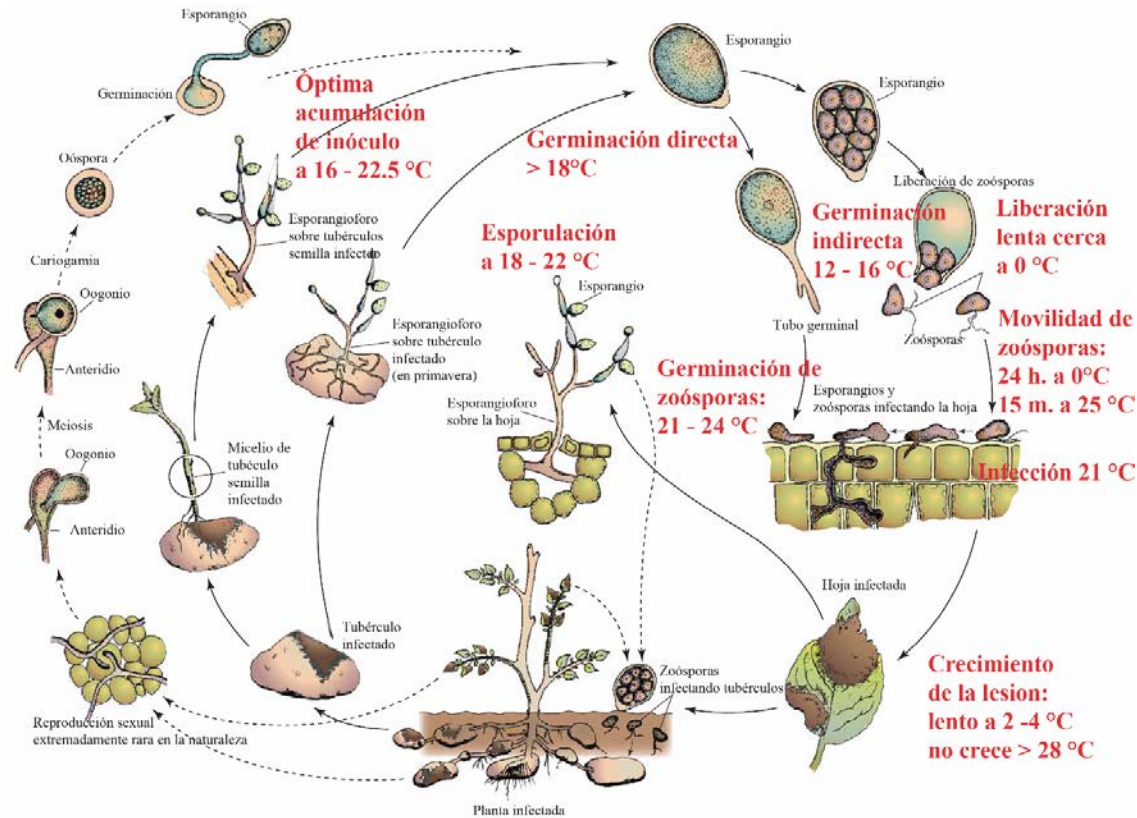
Anexo 1. Características químicas y de efectividad de los fungicidas evaluados

Grupo químico	Nombre común	Tipo de movilidad	Modo de acción	Germ. de esporangios	Crecimiento micelial	Esporulación	Acción preventiva	Acción curativa
ácido cinámico amida	dimethomorph	translaminar, acropétalo (bajo)	síntesis de la celulosa (pared celular)	•	•	••	••	•
cianoacetamida oxima	cimoxanil	translaminar, acropétalo (medio)	actividad multi - sitio		•	•	••	••
fosfonatos	ácido fosforoso	sistémico	actividad multi - sitio		•	••		••

Fuente: Modificado de (Friskop, Markell, y Khan 2021; Börner 2009; Acuña y Bravo 2019).

Elaboración propia.

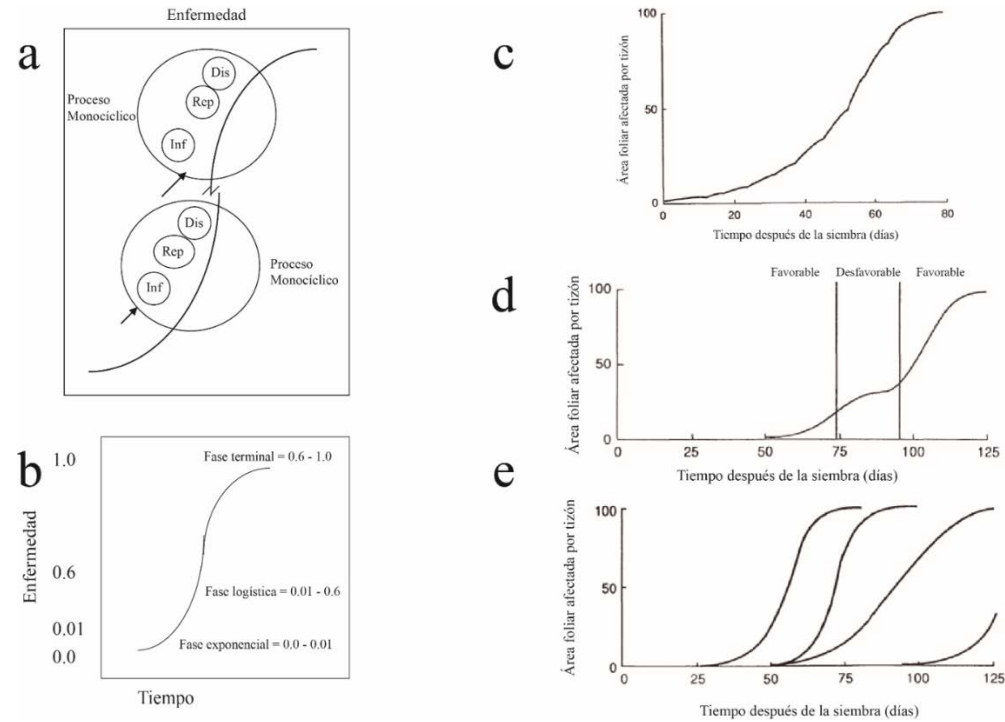
Anexo 2. Ciclo de vida de *Phytophthora infestans* y requerimientos de temperatura de eventos epidemiológicos



Fuente: Tomado de Plant Pathology (Agrios 2005, 425); Factors involved in the development of potato late blight disease (*Phytophthora infestans*) (Harrison 1995).

Elaboración propia.

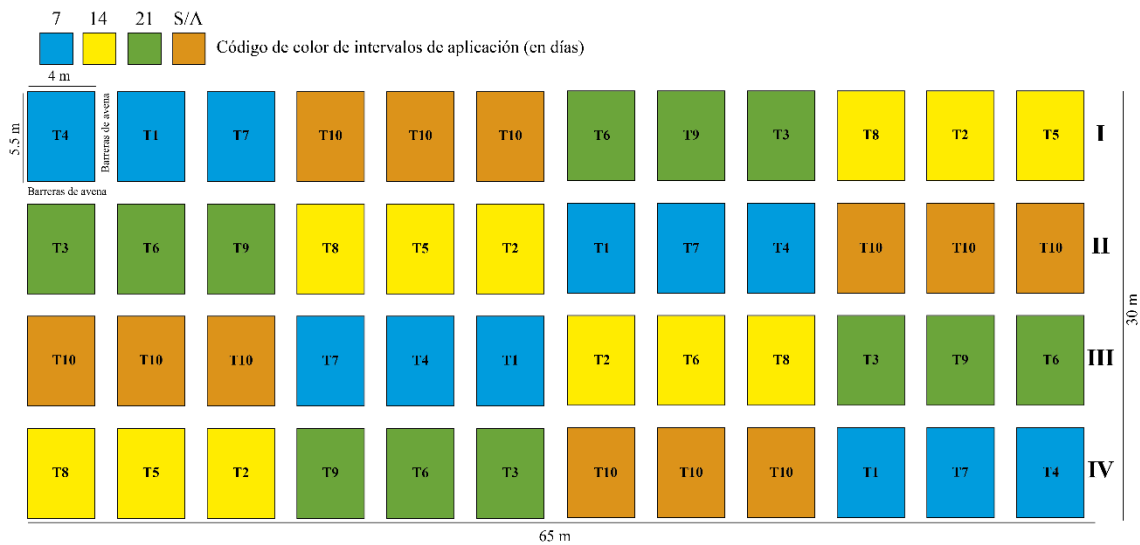
Anexo 3. Enfermedad policíclica: monociclos consecutivos (a), fases (b), incremento hipotético de área foliar con tizón (c), desarrollo de la epidemia en periodos favorables y desfavorables (d) y efecto del inicio de la epidemia y de la tasa de aparente de infección (e)



Fuente: Tomado de Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas, López 2000 a y b; Factors involved in the development of potato late blight disease (*Phytophthora infestans*), (Harrison 1995) c, d y e.

Elaboración propia.

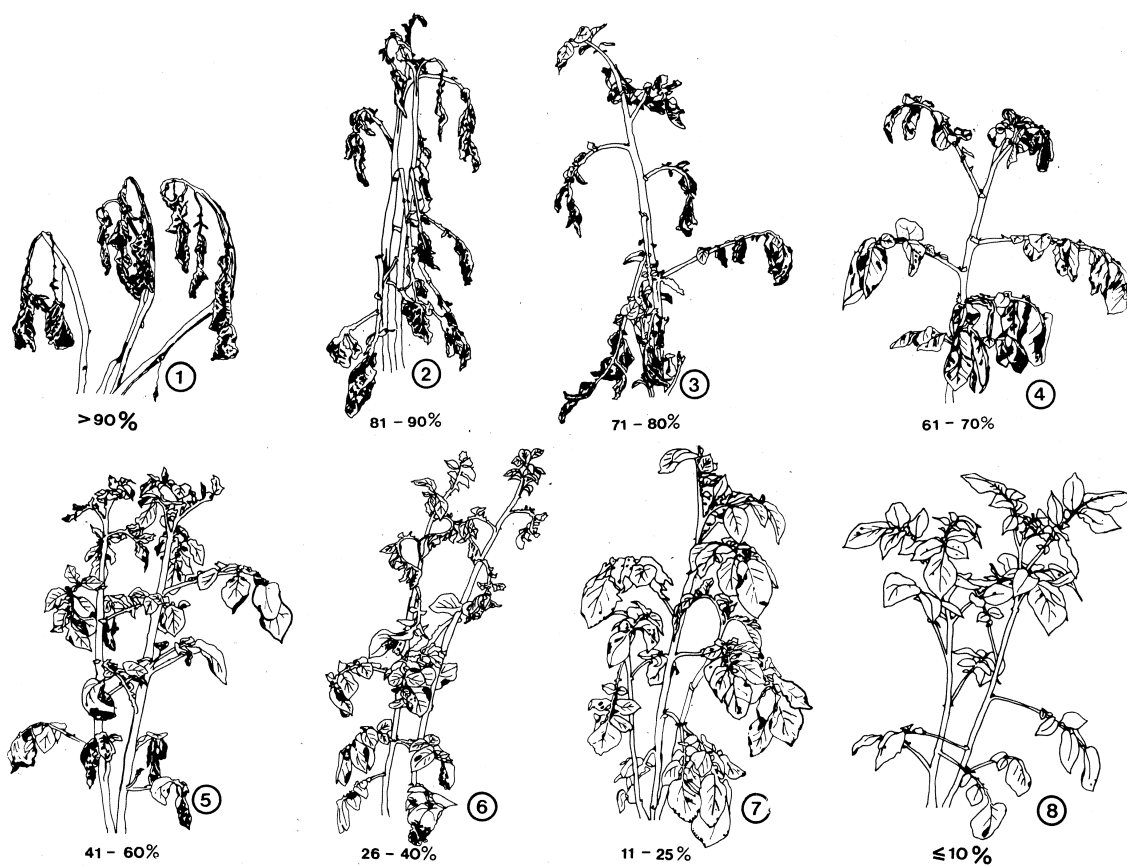
Anexo 4. Esquema general del experimento en cada altura



Fuente: Diseño experimental.

Elaboración propia

Anexo 5. Clave de escala de daño foliar por tizón tardío de la papa



Fuente: An Illustrated Assessment Key for Foliage Blight of Potatoes (Cruickshank, Stewart, y Wastie 1982).

Elaboración propia.

Anexo 6. Modificaciones al submodelo fungicidas

Se ha observado que los agricultores que usan bombas de mochila tienden a rociar alrededor de la planta hasta lograr una cobertura uniforme, por esta razón se asumió que la deposición de fungicida es uniforme en todo el follaje (Blandón-Díaz et al. 2011, 840) y esto facultó para utilizar un factor de residuo estándar de 0.0068 cm^3 (Van Haren y Jansen 2003). Después de la deposición, la cantidad residual de fungicida se modifica por dos factores de degradación, la temperatura del aire y la precipitación, y es considerada por las siguientes ecuaciones (Bruhn y Fry 1982), para temperaturas del aire promedio diarias por debajo de 25.2°C (apropiadas para las dos alturas en este estudio):

$$\text{Efecto_temperatura} = \min\{1, \exp [0.043 \times (\text{Tmp} - 15.5)]\}$$

donde Tmp = temperatura del aire promedio diaria ($^\circ\text{C}$);

$$\text{Efecto_lluvia} = \exp \{-1.091 \times [\text{Lluvia}^{**} (1/3)] + 0.313 \times [\text{DDAA} \times \text{Precipitación}]^{**} (1/3)\}$$

donde precipitación = precipitación diaria en centímetros y DDAA = días desde la aplicación anterior.

Usando las ecuaciones anteriores, la cantidad de fungicida en la superficie de una hoja en cualquier momento (Residuo_fungicida) fue igual a:

$$\text{Residuo_fungicida} (t) = \text{Residuo_fungicida} (t_{-1}) \times \text{Efecto_temperatura} \times \text{Efecto_lluvia}$$

donde Residuo_fungicida (t) = residuos de fungicida en la superficie de la hoja en el tiempo t .

El modelo de fungicida utilizó una curva simple de dosis/respuesta, estimada por una curva logística, para estimar un efecto fungicida protectante (Prot_efecto), y definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Protectante_efecto} = 1 - \{\exp [\log_{10} (\text{Residuo_fungicida}) + 4.5]\} / \{\exp [\log_{10} (\text{Residuo_fungicida})] + 100\}$$

El parámetro 4.5 en la ecuación se determinó mediante calibración (Blandón-Díaz et al. 2011, 841). El fungicida afecta el desarrollo de la enfermedad al reducir la probabilidad de infección, y la protección disminuye a medida que Prot_efecto se acerca a 1.

Fuente: Assessing the Adequacy of the Simulation Model LATEBLIGHT Under Nicaraguan Conditions (Blandón-Díaz et al. 2011).

Elaboración: Propia

Anexo 7. Estadísticos de agentes meteorológicos durante el experimento

Altura (msnm) del sito experimental		Tem (°C) ^d			HR (%) ^d			Prec (mm) ^d			Hum. hoja (h)		
		3050	2700	Sig. ^e	3050	2700	Sig. ^e	3050	2700	Sig. ^f	3050	2700	Sig. ^f
Seg. de día ^a	Estadístico												
Madrugada ^b	Mín.	3.6	4.2		57.2	67.7		0	0		0.17	0.17	
	Prom.	8.3	10.1	**	92.5	95.9	**	0.1	0.06	ns	0.96	0.96	ns
	Máx.	11.3	13.7		100.0	100.0		4.8	3.8		1	1	
	Rango	7.6	9.6		42.8	32.3		0	0		0	0	
	Suma							55.2	33.6		498.8	499.5	
Mañana ^b	Mín.	3.2	4.2		28.4	33.8		0	0		0.17	0.17	
	Prom.	12.8	14.5	**	76.9	79.0	*	0.04	0.02	ns	0.76	0.84	**
	Máx.	19.5	22.5		100.0	100.0		3.8	2.2		1	1	
	Rango	16.3	18.3		71.6	66.2		0	0		0.5	0.17	
	Suma							21.2	13.6		168	229.8	
Tarde ^b	Mín.	8.3	10.6		30.9	26.7		0	0		0.17	0.17	
	Prom.	15.4	18.1	**	70.2	68.2	**	0.32	0.35	ns	0.74	0.79	ns
	Máx.	21.2	26.7		99.1	100.0		19	21.2		1	1	
	Rango	12.9	16.1		68.2	73.3		0	0		0.67	0-33	
	Suma							180.4	209.4		118	117.3	
Noche ^b	Mín.	4.6	7.0		41.6	33.4		0	0		0.17	0.17	
	Prom.	10.1	12.0	**	90.6	94.8	**	0.14	0.13	ns	0.95	0.96	ns
	Máx.	15.5	17.9		100.0	100.0		6.4	18.2		1	1	
	Rango	10.8	10.9		58.4	66.6		0	0		0	0	
	Suma							79.8	80.1		443.3	510.3	
Diario ^c	Mín.	3.8	4.6		36.4	30.7							
	Prom.	11.6	13.7	**	82.5	84.2	**						
	Máx.	21	24.3		100.0	100.0							
	Rango	18.0	22.6		71.6	73.3							
	Suma							336.6	336.7		1228	1357	

Fuente: Registro de sensores de clima.

Elaboración propia

^a Segmentos del día: madrugada (0:00 a.m. – 6:00 a.m.); mañana (6:00 a.m. – 12:00 p.m.); tarde (12:00 p.m. – 18:00 p.m.); noche (18:00 p.m. – 24:00 p.m.)

^b 3050 msnm (n= 570); 2700 msnm (n= 594).

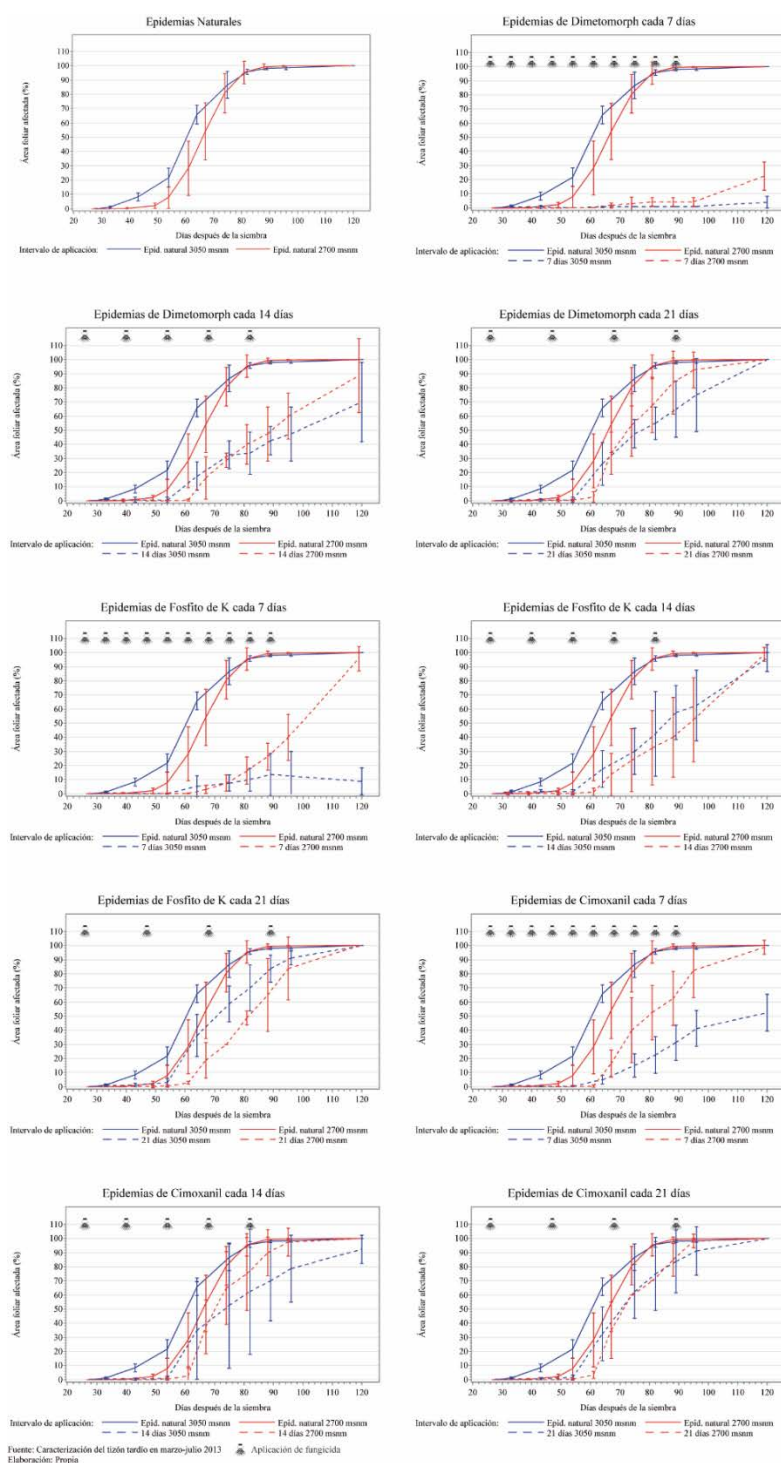
^c 3050 msnm (n= 2280); 2700 msnm (n= 2376).

^d Los sensores climáticos registraron cada 10 minutos.

^e Prueba de student: ** = significativo al 1 %, * = significativo al 5 %; ns = no significativo

^f Prueba de Mann-Whitney: ** = significativo al 1 %, * = significativo al 5 %; ns = no significativo

Anexo 8. Curvas de progreso de la epidemia de tizón tardío naturales y con aplicaciones de dimetomorph, fosfito de K y cimoxanil cada 7, 14 y 21 días a 3050 y 2700 msnm



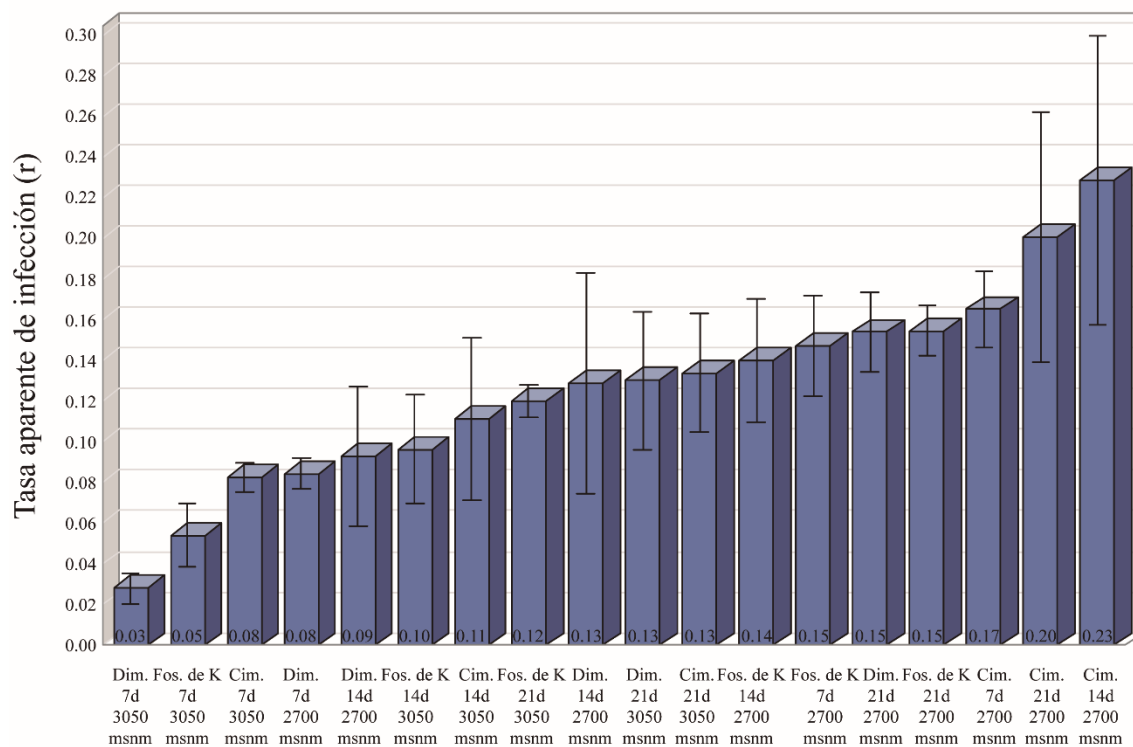
Fuente: Experimento eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Las barras de error representan la desviación estándar del promedio del porcentaje de enfermedad de 4 repeticiones en cada fecha de evaluación.

Anexo 9. Promedios de TAI (r) de tratamientos

Promedios de tasa aparente de infección



Tratamientos

Fuente: Experimento eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Las barras de error representan el error estándar del promedio de 4 repeticiones.

Anexo 10. Análisis de efectos simples de la TAI (r)

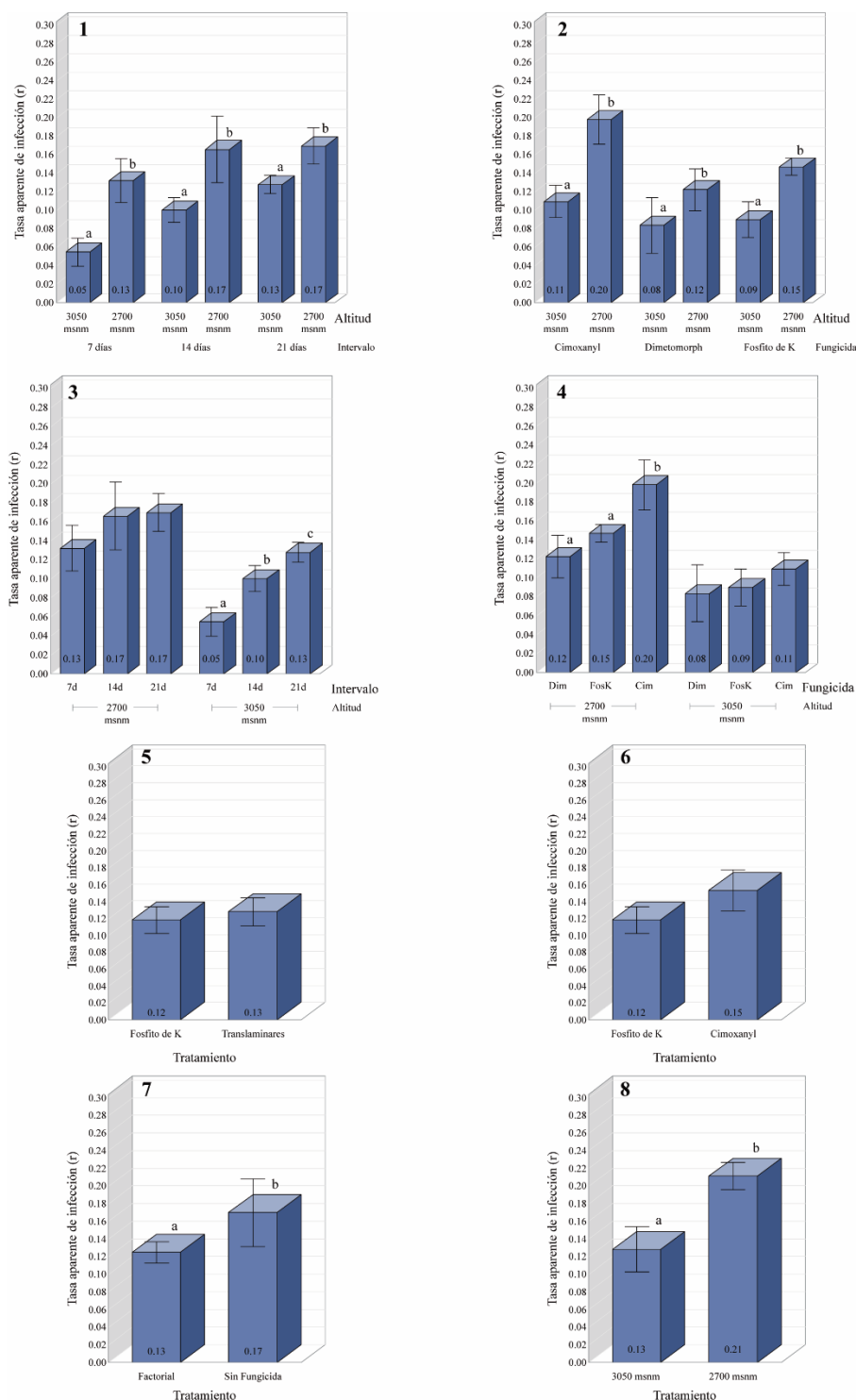
F. V.	GL	Cuadrados medios	Pr > F	
Intervalos de aplicación por fungicidas				
7 días	2	0.00945	<.0001	**
14 días	2	0.00839	<.0001	**
21 días	2	0.00206	0.0167	ns
Fungicidas por intervalos de aplicación				
Cimoxanyl	2	0.00539	0.0001	**
Dimetomorph	2	0.01512	<.0001	**
Fosfito de K	2	0.00271	0.0057	**
Intervalos de aplicación por altitud				
7 días	1	0.03601	<.0001	**
14 días	1	0.02593	<.0001	**
21 días	1	0.01041	<.0001	**
Altitud por intervalos de aplicación				
3050 msnm	2	0.016407	<.0001	**
2700 msnm	2	0.005105	0.0002	**
Fungicidas por altitud				
Cimoxanyl	1	0.047394	<.0001	**
Dimetomorph	1	0.008992	<.0001	**
Fosfito de K	1	0.019679	<.0001	**
Altitud por fungicidas				
3050 msnm	2	0.002136	0.0146	*
2700 msnm	2	0.017905	<.0001	**

** = Significativo al 1 %; * = Significativo al 5 %; ns = no significativo

Fuente: Evaluaciones del AFA en dos sitios experimentales

Elaboración propia

Anexo 11. Promedios de TAI (r) y rangos de Tukey (5 %) y DMS (5 %) de intervalos de aplicación



Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Gráficos diferenciados por: intervalos de aplicación por altitud (1), fungicidas por altitud (2), altitud por intervalos de aplicación (3) y altitud por fungicida (4).

Contrastes ortogonales de interés (5-8).

Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas.

Anexo 12. Análisis de efectos simples-simples de la severidad relativa (ABEDER)

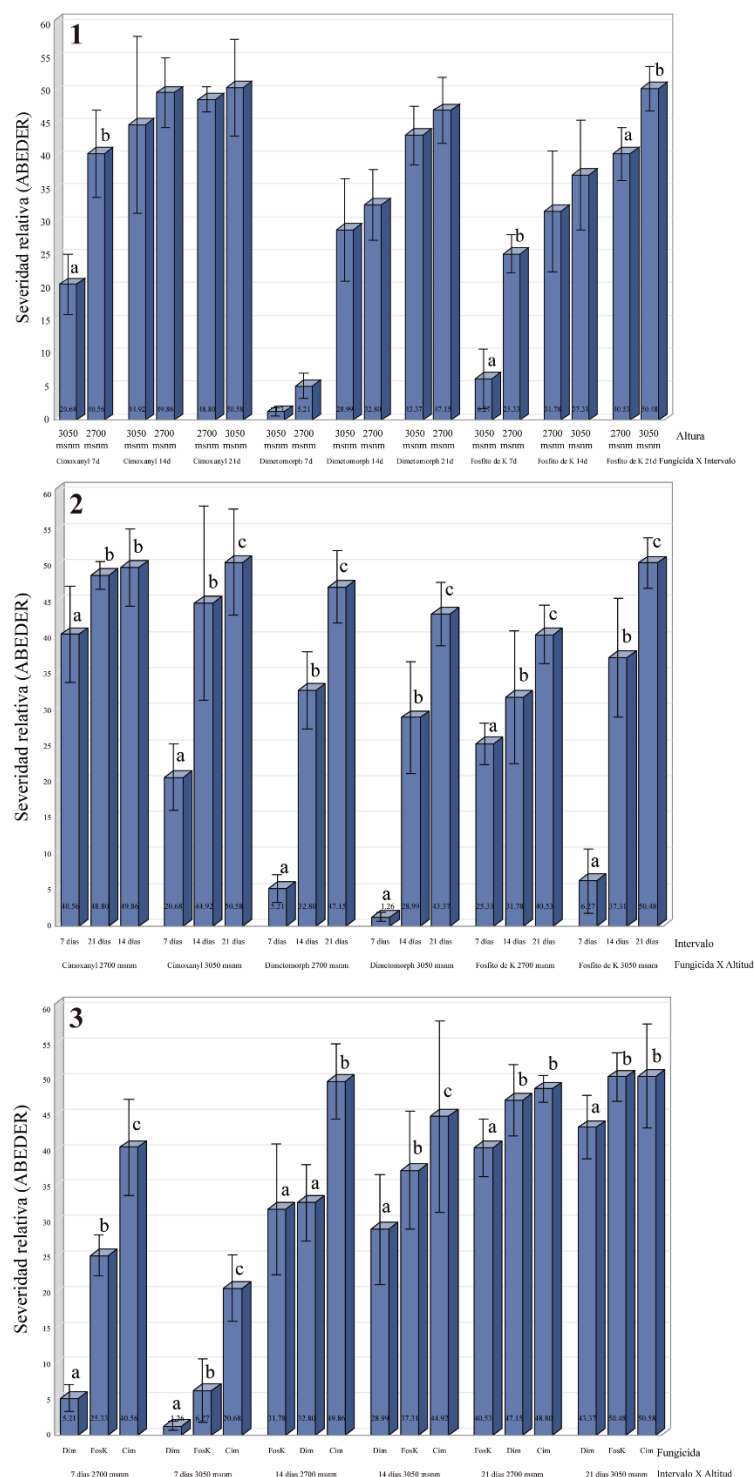
F. V.	GL	Cuadrados medios	Pr > F	
Fungicidas con intervalos de aplicación por altitud				
Cimoxanyl 7 días	1	790	<.0001	*
Cimoxanyl 14 días	1	49	0.1199	ns
Cimoxanyl 21 días	1	6	0.5688	ns
Dimetomorph 7 días	1	31	0.2096	ns
Dimetomorph 14 días	1	29	0.2256	ns
Dimetomorph 21 días	1	29	0.2292	ns
Fosfito de K 7 días	1	726	<.0001	*
Fosfito de K 14 días	1	61	0.0834	ns
Fosfito de K 21 días	1	198	0.0032	*
F. V.	GL	Cuadrados medios	Pr > F	
Fungicidas con altitud por intervalos de aplicación				
Cimoxanyl 2700 msnm	2	104	0.01	*
Cimoxanyl 3050 msnm	2	1009	<.0001	**
Dimetomorph 2700 msnm	2	1817	<.0001	**
Dimetomorph 3050 msnm	2	1833	<.0001	**
Fosfito de K 2700 msnm	2	233	0.0002	**
Fosfito de K 3050 msnm	2	2061	<.0001	**
F. V.	GL	Cuadrados medios	Pr > F	
Intervalos de aplicación con altitud por fungicida				
7 días 2700 msnm	2	1257	<.0001	**
7 días 3050 msnm	2	407	<.0001	**
14 días 2700 msnm	2	412	<.0001	**
14 días 3050 msnm	2	254	<.0001	**
21 días 2700 msnm	2	77	0.0288	*
21 días 3050 msnm	2	68	0.0407	*

** = Significativo al 1 %; * = Significativo al 5 %; ns = no significativo

Fuente: Evaluaciones del AFA en dos sitios experimentales

Elaboración propia

Anexo 13. Promedios de severidad relativa (ABEDER) y rangos DMS (5 %) de las interacciones de factores



Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

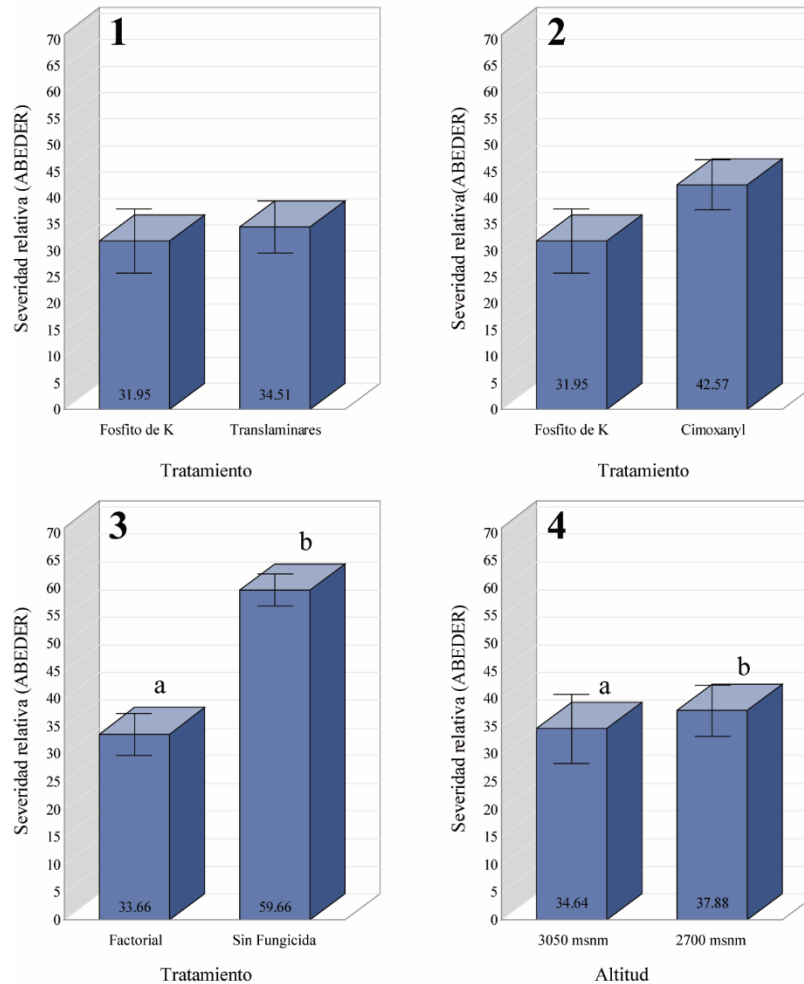
Gráficos diferenciados por: intervalos por fungicida por altitud (1), fungicida x altitud por intervalo de aplicación (2) e intervalos de aplicación x altitud por fungicida (3).

Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas.

Las barras de error representan el error estándar del promedio de 4 repeticiones

Anexo 14. Promedios de la severidad relativa (ABEDER) y rangos DMS (5 %) de contrastes ortogonales de interés

Promedios de severidad de tizón tardío

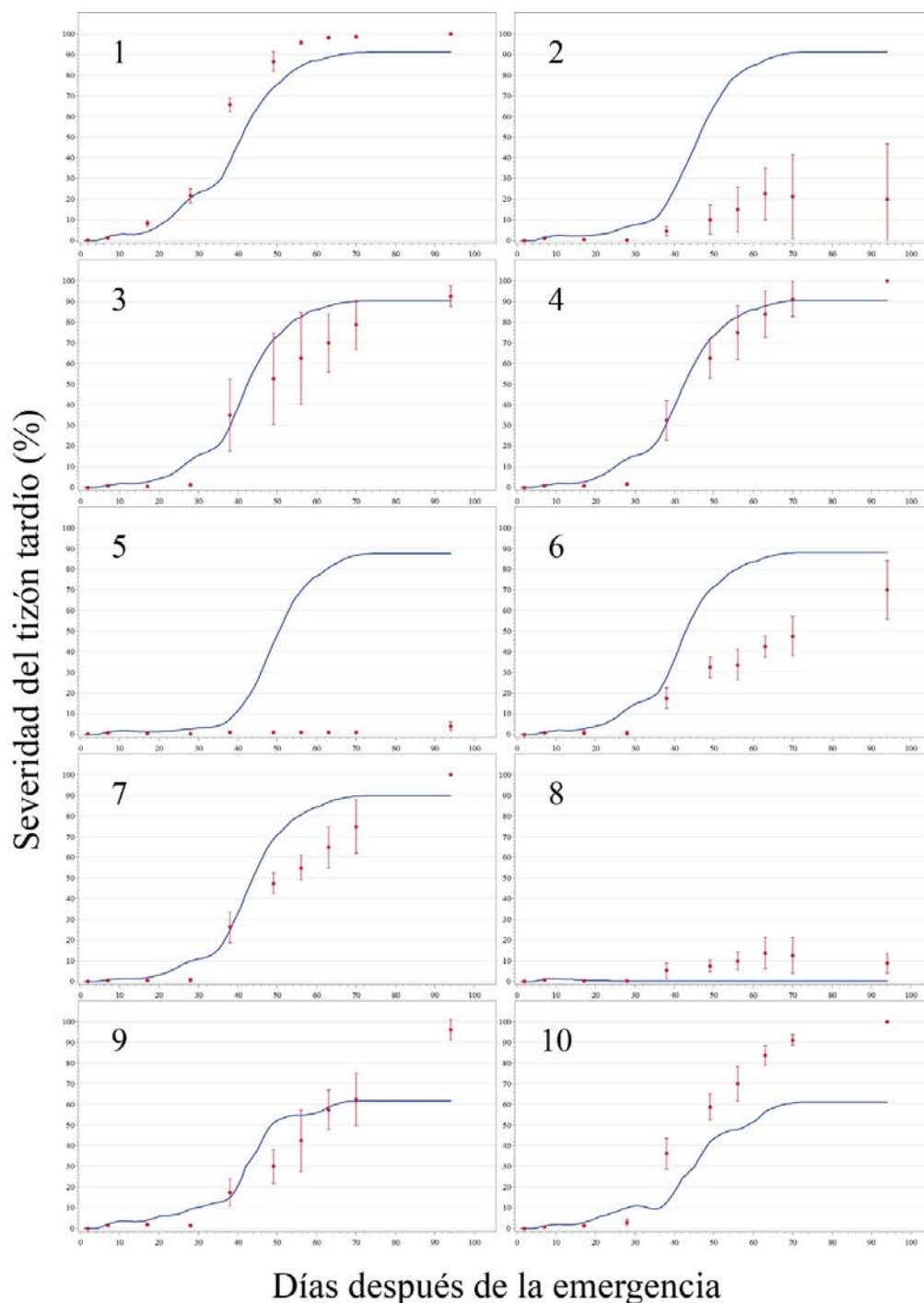


Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Promedios con la misma letra no tienen diferencias significativas

Anexo 15. Curvas de progreso de epidemias de tizón tardío, simulada (azul) y observada (rojo), de fungicidas sistémicos e intervalos de aplicación a 12 °C



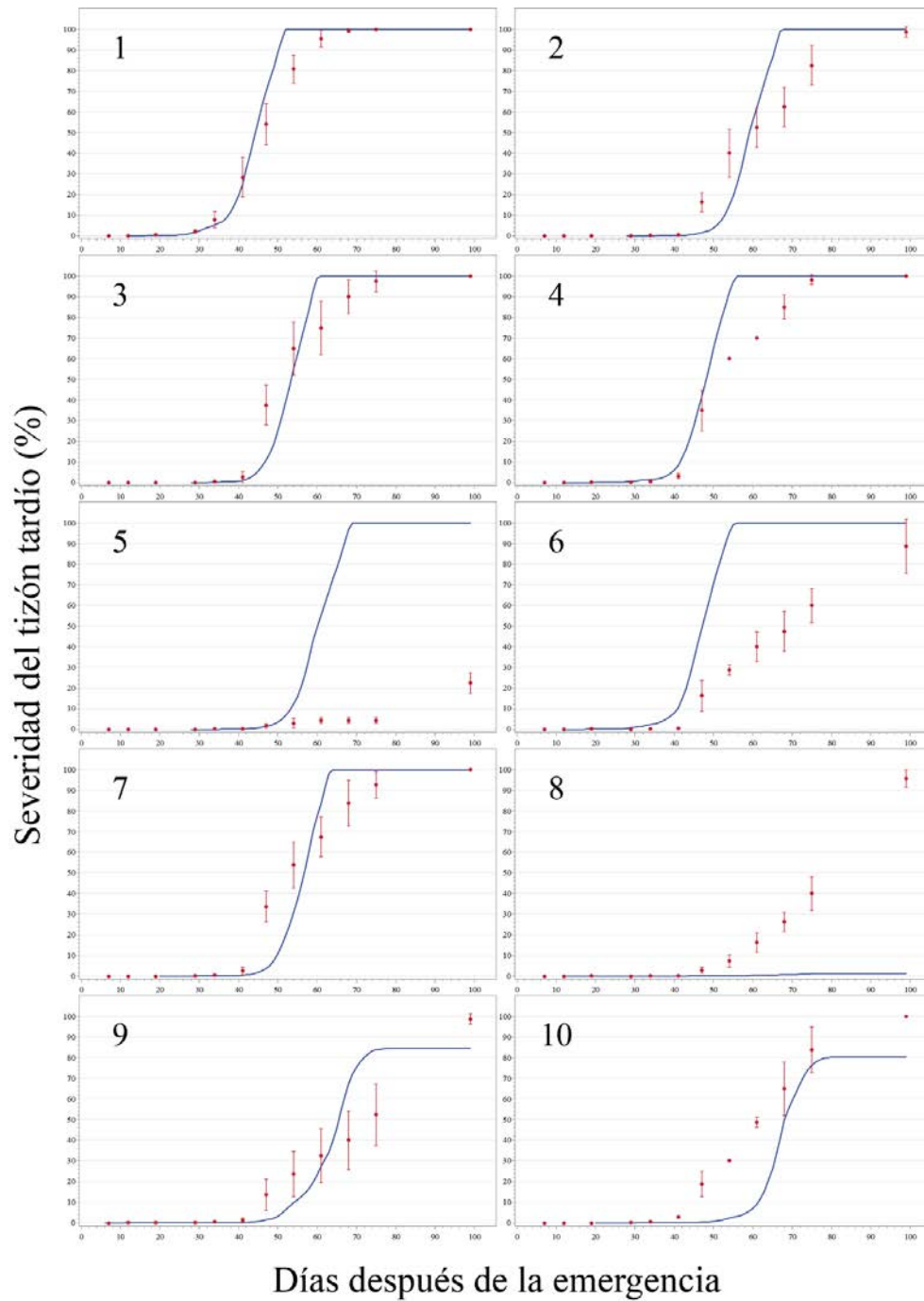
Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Epidemia natural (1), cimoxanil a 7, 14 y 21 días (2-4), dimetomorph a 7, 14 y 21 días (5-7) y fosfito de K a 7, 14 y 21 días (8-10).

Las líneas verticales representan la desviación estándar de la severidad observada promedio.

Anexo 16. Curvas de progreso de epidemias de tizón tardío, simulada (azul) y observada (rojo), de fungicidas sistémicos e intervalos de aplicación a 14 °C



Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Epidemia natural (1), cimoxanil a 7, 14 y 21 días (2-4), dimetomorph a 7, 14 y 21 días (5-7) y fosfito de K a 7, 14 y 21 días (8-10).

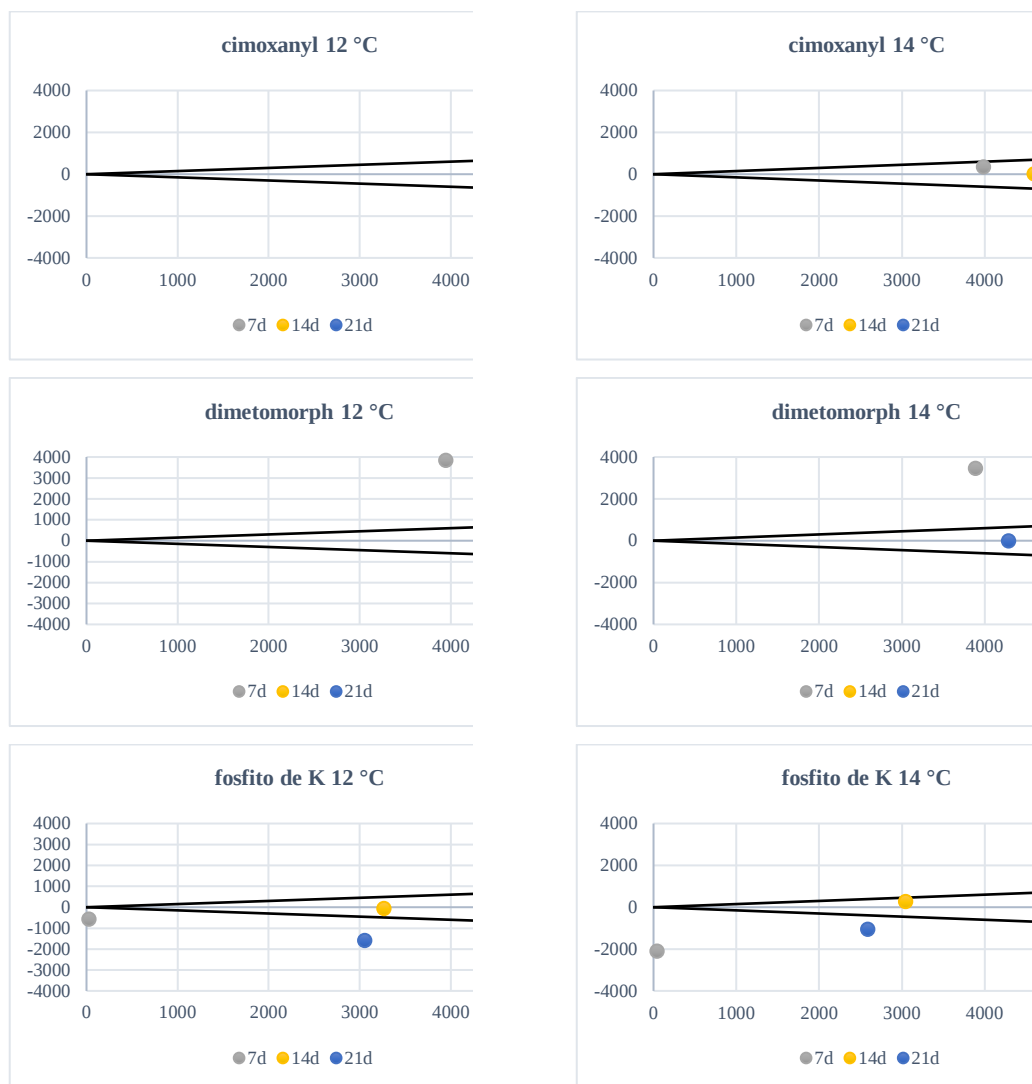
Las líneas verticales representan la desviación estándar de la severidad observada promedio

**Anexo 17. Pruebas de intervalo de confianza y de sobre de aceptación (PSA)
para la severidad observada y simulada de fungicidas sistémicos aplicados a
varios intervalos a 12 °C y 14 °C**

Temp.	Fungicida	Intervalo (días)	n	AUDPC_obs prom.	AUDPC_obs L_inf.	AUDPC_obs L_sup.	AUDPC_sim	Prueba Int_conf	Calif. (%)	Dif AUDPC (Sim - Obs)	Límite PSA	PSA	Calif. PSA (%)
12 °C	cimoxanil	7	4	1846	1411	2280	4499			2653	675		
	cimoxanil	14	4	4119	2775	5463	4801	1		682	720	1	
	cimoxanil	21	4	4659	3907	5411	4821	1	67	162	723	1	67
	dimetomorph	7	4	108	58	158	3950			3842	593		
	dimetomorph	14	4	2605	1917	3293	4664			2059	700		
	dimetomorph	21	4	3922	3465	4380	4638		0	716	696		0
	fosfito de K	7	4	596	169	1024	27			-569	4		
	fosfito de K	14	4	3322	2506	4137	3267	1		-55	490	1	
	fosfito de K	21	4	4649	4296	5003	3056		33	-1593	458		33
	Sin Fungicida		12	5882	5803	5960	5046		100	-836	757		100
14 °C	cimoxanil	7	4	3657	2997	4318	3989	1		332	598	1	
	cimoxanil	14	4	4586	4050	5121	4602	1		16	690	1	
	cimoxanil	21	4	4480	4287	4673	5135		67	655	770	1	100
	dimetomorph	7	4	429	269	589	3893			3464	584		
	dimetomorph	14	4	2921	2440	3401	5220			2299	783		
	dimetomorph	21	4	4314	3807	4822	4293	1	33	-21	644	1	33
	fosfito de K	7	4	2141	1882	2401	45			-2096	7		
	fosfito de K	14	4	2777	1862	3692	3047	1		270	457	1	
	fosfito de K	21	4	3650	3244	4056	2593		33	-1057	389		33
	Sin Fungicida		12	5280	5137	5423	5517		100	237	828	1	200

Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.
Elaboración propia.

Anexo 18. Desempeño del simulador LB2004 con fungicidas sistémicos aplicados a varios intervalos a 12 °C y 14 °C



Fuente: Experimento de eficiencia de fungicidas sistémicos.

Elaboración propia.

Prueba de sobre de aceptación (PSA).