

Phosphites as alternative for the management of phytopathological problems

Los fosfitos como alternativa para el manejo de problemas fitopatológicos

Moisés Gilberto Yáñez-Juárez, Carlos Alfonso López-Orona, Felipe Ayala-Tafoya*, Leopoldo Partida-Ruvalcaba, Teresa de Jesús Velázquez-Alcaraz y Raymundo Medina-López, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado Km 17.5, Aparatado Postal 25, CP. 80000, Culiacán, Sinaloa, México. *Autor para correspondencia: tafoya@uas.edu.mx.

Recibido: 31 de Octubre, 2017.

Aceptado: 22 de Diciembre, 2017.

Yáñez-Juárez MG, López-Orona CA, Ayala-Tafoya F, Partida-Ruvalcaba L, Velázquez-Alcaraz TJ, Medina-López R. 2017. Phosphites as alternative for the management of phytopathological problems. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1): 79-94.

DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1710-7

Primera publicación DOI: 01 de Enero, 2018.

First DOI publication: January 01, 2018.

Resumen. Los fosfitos son compuestos derivados del ácido fosforoso empleados como alternativa para el control de organismos fitoparásitos y su eficacia se ha probado contra protozoarios, oomicetes, hongos, bacterias y nematodos; sin embargo, en comparación con los fungicidas convencionales sintetizados, generalmente son menos eficaces para disminuir el daño por fitopatógenos. El ion fosfito es fácilmente transportado en las plantas vía xilema y floema, por lo que se ha utilizado en aplicación foliar, baño a la raíz y cuello de la planta, inyección al tronco, a través de riego por goteo mezclado en la solución nutritiva en hidroponía, tratamiento a semilla, aplicación aérea en bajo volumen o como tratamiento en inmersión de semillas y frutos. Los

Abstract. Phosphites are compounds derived from phosphorous acid used as an alternative for the control of phytoparasitic organisms and their effectiveness has been tested against protozoa, oomycetes, fungi, bacteria and nematodes; however, compared to conventional synthesized fungicides, phosphites are generally less effective at reducing damage by phytopathogens. The phosphite ion is easily transported in the plants via xylem and phloem, so it has been used in foliar application, drench of plant root and neck, injection trunk, through drip irrigation mixed in the nutrient solution in hydroponics, seed treatment, aerial application in low volume, or as treatment in immersion of seeds and fruits. The mechanisms of action involved in the prophylactic effects of phosphites are diverse and include the stimulation of biochemical and structural defense mechanisms in plants and direct action that restricts the growth, development and reproduction of phytopathogenic organisms.

Key words: potassium phosphite, biostimulant, control of phytopathogens.

mecanismos de acción involucrados en los efectos profilácticos de los fosfitos son diversos e incluyen la estimulación de los mecanismos de defensa bioquímica y estructural en las plantas, además de la acción directa que restringe el crecimiento, desarrollo y reproducción de los organismos fitopatógenos.

Palabras clave: fosfito de potasio, bioestimulante, control de fitopatógenos.

El uso irracional en la agricultura de pesticidas sintetizados, incrementa los problemas de contaminación ambiental, salud pública, disminución de la biodiversidad en los agroecosistemas y desarrollo de organismos fitopatógenos con resistencia, además, la comercialización agrícola actual demanda productos inocuos para los consumidores, provenientes de procesos con bajo impacto ambiental. Así, adquiere relevancia el control de enfermedades basado en el empleo de sales inorgánicas, que además de ser eficaces para el manejo de enfermedades en los cultivos muestren mínimas consecuencias adversas. Al respecto, Deliopoulos *et al.* (2010) reportan que se han utilizado 34 diferentes sales con esa finalidad, además indican que las sales de fosfito destacan por su frecuencia de utilización y eficacia en el control.

Los fosfitos son oxianiones derivados del ácido fosforoso (H_3PO_3^-), que regularmente se combinan con cationes no metales como potasio, sodio, calcio o amonio. Los términos “fosfito” y “fosfanato” son comúnmente utilizados en la literatura para referirse a las sales derivadas del ácido fosforoso, al igual que “hidrogenofosfanatos”, “ortofosfitos”, “compuestos del ácido fosfónico” o “compuestos del ácido fosforoso” (Deliopoulos *et al.*, 2010).

La diferencia química entre fosfato (H_2PO_4^-) y fosfito (H_2PO_3^-) es un átomo de oxígeno el cual es

The irrational use of synthetic pesticides in agriculture increases problems of environmental pollution and public health, and decreases biodiversity in the agroecosystems as well as the development of resistant-phytopathogenic organisms. Furthermore, the current agricultural marketing requires products that are safe for consumers and created using low environmental impact processes. Thus, disease control based on the use of inorganic salts, which aside from being effective in managing crop diseases have minimum adverse consequences, becomes relevant. To this regard, Deliopoulos *et al.* (2010) reported that 34 different salts have been used for such purpose, and suggested that phosphite salts stand out because of their use frequency and control effectiveness.

Phosphites are oxyanions derived from phosphorous acid (H_3PO_3^-) regularly combined with non-metal cations, such as potassium, sodium, calcium or ammonia. The terms “phosphite” and “phosphonate” are commonly used in the literature to refer to salts derived from phosphorous acid, the same as “hydrogen phosphates”, “orthophosphites”, “phosphonic acid compounds” and “phosphorous acid compounds” (Deliopoulos *et al.*, 2010).

The chemical difference between phosphate (H_2PO_4^-) and phosphite (H_2PO_3^-) is an oxygen atom that is replaced by another of hydrogen (Figure 1). When oxygen is replaced, there is a profound difference in the way phosphates and phosphites behave in living organisms (McDonald *et al.*, 2001; Achary *et al.*, 2017). Due to their structural similarity, phosphites are thought to be akin to phosphates. However, the use of phosphites as fungicides and biostimulants to control plant pathogens is widely accepted, but their use as a phosphorus source in plant nutrition is currently debated (Borza *et al.*, 2014; Gómez-Merino and Trejo-Téllez, 2015; Alexandersson *et al.*, 2016; Manna *et al.*, 2016). Such difference gives

sustituido por otro de hidrógeno (Figura 1). La sustitución del oxígeno da lugar a profundas diferencias en la manera en que los fosfatos y fosfitos se comportan en los organismos vivos (McDonald *et al.*, 2001; Achary *et al.*, 2017). Debido a su similitud estructural, los fosfitos son considerados como análogos de los fosfatos, sin embargo, el uso de los fosfitos como fungicidas y bioestimulantes para el control de patógenos de plantas es ampliamente aceptado, pero su utilización como fuente de fósforo en la nutrición de plantas es actualmente debatida (Borza *et al.*, 2014; Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015; Alexandersson *et al.*, 2016; Manna *et al.*, 2016). Además, esa diferencia da a los fosfitos una mayor movilidad en el suelo y en los tejidos de las plantas, así como una mayor capacidad para penetrar a través de hojas, tallos y raíces (Tkaczyk *et al.*, 2016).

El uso de los fosfitos en la agricultura, se ha investigado principalmente por su acción en el control de organismos fitoparásitos o como fuente de nutrición en plantas cultivadas (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015; Alexandersson *et al.*, 2016). Esto último puede ocurrir únicamente si los fosfitos se aplican al suelo y entran en contacto con bacterias que tienen la capacidad de oxidarlos a fosfatos (McDonald *et al.*, 2001; Manna *et al.*, 2016). No obstante, este proceso es muy lento, y puede tomar hasta cuatro meses para completarse, lo que resulta impráctico para la agricultura (McDonald *et al.*, 2001; Lovatt y Mikkelsen, 2006).

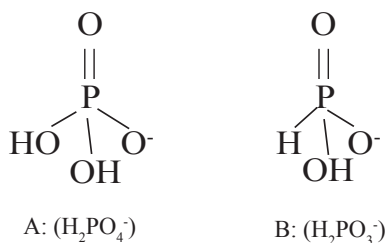


Figura 1. Estructura del grupo fosfato (A) y fosfito (B).
Figure 1. Structure of the phosphate (A) and phosphite (B) group.

phosphites a greater mobility in soil and plant tissues, as well as a greater capacity to penetrate through leaves, stems and roots (Tkaczyk *et al.*, 2016).

The use of phosphites in agriculture has been studied mainly because of their action to control phytoparasite organisms or as a nutrition source for cultivated plants (Gómez-Merino and Trejo-Téllez, 2015; Alexandersson *et al.*, 2016). The latter may occur only if phosphites are applied to soil and come into contact with bacteria that have the capacity to oxidize them to phosphates (McDonald *et al.*, 2001; Manna *et al.*, 2016). However, since this is a very slow process that can take up to four months, it becomes impractical in agriculture (McDonald *et al.*, 2001; Lovatt and Mikkelsen, 2006).

In early 1930, researchers concluded that phosphites were not an efficient nutrition source for plants. However, 40 years later, phosphites returned to the agrochemicals market as an alternative for controlling plant diseases, when the French company Rhône-Poulenc offered the active ingredient fosetyl-aluminum to control mildews and diseases caused the *Phytophthora* genus (Tkaczyk *et al.*, 2016; Achary *et al.*, 2017). Phosphites, as an alternative for controlling phytoparasite organisms, have been extensively studied and proven to be effective against protozoa, oomycetes, fungi, bacteria and phytoparasite nematodes (Table 1), as well as biostimulators (Gómez-Merino and Trejo-Téllez, 2015) that reduce damages caused by weeds (Manna *et al.*, 2016; Achary *et al.*, 2017) and UV-B radiation (Oyarburo *et al.*, 2015).

APPLICATION METHODS

The phosphite ion is easily transported in plants via xylem and phloem (McDonald *et al.*, 2001; Tkaczyk *et al.*, 2016), so it has been used in foliar applications (Rebollar-Alviter *et al.*, 2010; Silva *et*

Fue a principios de 1930 cuando se concluyó que los fosfitos no eran fuente eficiente de fósforo para la nutrición de las plantas y 40 años después, regresó al mercado de los agroquímicos como alternativa para el manejo de enfermedades, cuando la compañía Francesa Rhône-Poulenc ofreció el ingrediente activo fosetil-aluminio para el control de mildius y enfermedades causadas por el género *Phytophthora* (Tkaczyk *et al.*, 2016; Achary *et al.*, 2017). Los fosfitos, como alternativa para el control de organismos fitoparásitos, han sido estudiados ampliamente y su eficacia se ha probado contra protozoarios, oomycetes, hongos, bacterias y nematodos fitoparásitos (Cuadro 1); adicionalmente, se ha comprobado su eficacia como bioestimulador (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015), para disminuir los daños por malezas (Manna *et al.*, 2016; Achary *et al.*, 2017) y radiación UV-B (Oyarburo *et al.*, 2015).

MÉTODOS DE APLICACIÓN

El ion fosfito es fácilmente transportado en las plantas vía xilema y floema (McDonald *et al.*, 2001; Tkaczyk *et al.*, 2016), por lo que se ha utilizado en aplicación foliar (Rebollar-Alviter *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2011; Pagani *et al.*, 2014; Yáñez *et al.*, 2014; Liljeroth *et al.*, 2016; Borza *et al.*, 2017), baño a la raíz y cuello de la planta (Oka *et al.*, 2007; Akinsanmi y Dreth, 2013), inyección al tronco (Bock *et al.*, 2012; Akinsanmi y Dreth, 2013; Aćimović *et al.*, 2015; Aćimović *et al.*, 2016), a través de riego por goteo mezclado en la solución nutritiva en hidroponía (Förster *et al.*, 1998), tratamiento a semilla (Abbasi y Lazarovits 2006; Lobato *et al.*, 2008), aplicación aérea en bajo volumen (Hardy *et al.*, 2001) o como tratamiento en inmersión de semillas y frutos (Anderson *et al.*, 2012; Cerioni *et al.*, 2013, Borin *et al.*, 2017).

et al., 2011; Pagani *et al.*, 2014; Yáñez *et al.*, 2014; Liljeroth *et al.*, 2016; Borza *et al.*, 2017), drench of plants root and neck (Oka *et al.*, 2007; Akinsanmi and Dreth, 2013), trunk injection (Bock *et al.*, 2012; Akinsanmi and Dreth, 2013; Aćimović *et al.*, 2015; Aćimović *et al.*, 2016) through drip irrigation mixed in a nutrient solution in hydroponics (Förster *et al.*, 1998), seed treatments (Abbasi and Lazarovits 2006; Lobato *et al.*, 2008), low-volume aerial applications (Hardy *et al.*, 2001) or as a treatment in seed and fruits immersion (Anderson *et al.*, 2012; Cerioni *et al.*, 2013, Borin *et al.*, 2017).

EFFECTIVENESS

The levels of effectiveness of phosphites to control phytoparasite organisms vary depending on the ion bonded to phosphite, application method, pathogen organism and host plant (Table 2; Figure 2). For example, mandarin orange fruits immersed in solutions containing calcium and potassium phosphites contributed to reduce 50% of fruits infected with citrus green mold caused by *Penicillium digitatum* (Cerioni *et al.*, 2013); also, soja plants treated with potassium phosphite showed up to 50% less damage by *Peronospora manshurica* than non-treated plants (Silva *et al.*, 2011). Abbasi and Lazarovits (2006) reported 80% less cucumber plants infected by *Pythium* spp. when seeds were treated by immersion in solutions containing copper phosphite. Ogoshi *et al.* (2013) obtained a 62.5% decrease in the severity of *Colletotrichum gloeosporioides* in coffee plants treated with potassium phosphite. In another experiment, 93% of papaya plants treated with potassium phosphite survived the attack of *Phytophthora palmivora*, but only 24% of non-treated plants survived (Vawdrey and Westerhuis, 2007).

Cuadro 1. Organismos fitoparásitos controlados con fosfitos.
Table 1. Control of phytoparasite organisms using phosphites.

Organismo fitoparásito	Planta hospedante	Fosfito	Referencia
Protozoarios			
<i>Plasmodiophora brassicae</i>	<i>Brassica rapa</i>	Potasio	Kammerich <i>et al.</i> , 2014
Oomycetes			
<i>Peronospora destructor</i>	<i>Allium cepa</i>	Potasio	Monsalve <i>et al.</i> , 2012
<i>P. manshurica</i>	<i>Glicine max</i>	Potasio	Silva <i>et al.</i> , 2011
<i>P. parasitica</i>	<i>Brassica oleracea</i>	Potasio	Becót <i>et al.</i> , 2000
<i>Phytophthora cinnamomi</i>	<i>Macadamia</i> spp.	Potasio	Akinsanmi y Dreth, 2013
<i>P. cinnamomi</i>	<i>Ananas comosus</i>	Potasio	Anderson <i>et al.</i> , 2012
<i>Phytophthora infestans</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	Aluminio	Kromann <i>et al.</i> , 2012
<i>P. infestans</i>	<i>S. tuberosum</i>	Calcio	Lobato <i>et al.</i> , 2008
<i>P. infestans</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Borza <i>et al.</i> , 2017
<i>P. infestans</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Kromann <i>et al.</i> , 2012
<i>P. infestans</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Liljeroth <i>et al.</i> , 2016
<i>P. nicotianae</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Potasio	Smillie <i>et al.</i> , 1989
<i>P. palmivora</i>	<i>Carica papaya</i>	Potasio	Smillie <i>et al.</i> , 1989
<i>Plasmopara viticola</i>	<i>Vitis vinifera</i>	Potasio	Pinto <i>et al.</i> , 2012
<i>Pseudoperonospora cubensis</i>	<i>Cucumis melo</i>	Potasio	Méndez <i>et al.</i> , 2010
<i>Pythium aphanidermatum</i>	<i>C. sativus</i>	Cobre	Abbasi y Lazarovits, 2006
<i>P. irregulare</i>	<i>C. sativus</i>	Cobre	Abbasi y Lazarovits, 2006
<i>P. ultimum</i>	<i>C. sativus</i>	Cobre	Abbasi y Lazarovits, 2006
<i>P. ultimum</i>	<i>C. sativus</i>	Potasio	Mofidnakhai <i>et al.</i> , 2016
Hongos			
<i>Alternaria alternata</i>	<i>Malus domestica</i>	Potasio	Reuveni <i>et al.</i> , 2003
<i>Cercospora coffeicola</i>	<i>Coffea arabica</i>	Potasio	Costa <i>et al.</i> , 2014
<i>Cochliobolus miyabeanus</i>	<i>Oryza sativa</i>	Potasio	Nascimento <i>et al.</i> , 2016
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	<i>C. arabica</i>	Potasio	Ogoshi <i>et al.</i> , 2013
<i>C. gloeosporioides</i>	<i>Fragaria vesca</i>	Potasio	MacKenzie <i>et al.</i> , 2009
<i>C. gloeosporioides</i>	<i>Malus domestica</i>	Potasio	Araujo <i>et al.</i> , 2010
<i>Fusarium solani</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	Calcio	Lobato <i>et al.</i> , 2008
<i>F. solani</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Lobato <i>et al.</i> , 2008
<i>Fusicladium effusum</i>	<i>Carya illinoensis</i>	Potasio	Bock <i>et al.</i> , 2012
<i>Hemileia vastatrix</i>	<i>Coffea arabica</i>	Potasio	Costa <i>et al.</i> , 2014
<i>Oidium</i> sp.	<i>Cucumis sativus</i>	Potasio	Yáñez <i>et al.</i> , 2012
<i>Oidium</i> sp.	<i>C. sativus</i>	Potasio	Yáñez <i>et al.</i> , 2014
<i>Penicillium digitatum</i>	<i>Citrus limon</i>	Potasio	Cerioni <i>et al.</i> , 2013
<i>P. italicum</i>	<i>C. limon</i>	Potasio	Cerioni <i>et al.</i> , 2013
<i>P. expansum</i>	<i>Malus domestica</i>	Potasio	Amiri y Bompeix, 2011
<i>P. expansum</i>	<i>Malus domestica</i>	Potasio	Lai <i>et al.</i> , 2017
<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	Calcio	Lobato <i>et al.</i> , 2008
<i>R. solani</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Lobato <i>et al.</i> , 2008
<i>Venturia inaequalis</i>	<i>S. tuberosum</i>	Potasio	Percival <i>et al.</i> , 2009
<i>V. pirina</i>	<i>Pyrus communis</i>	Potasio	Percival <i>et al.</i> , 2009
Bacterias			
<i>Erwinia carotovora</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	Potasio	Lobato <i>et al.</i> , 2011
<i>E. amylovora</i>	<i>Pyrus malus</i>	Potasio	Aćimović <i>et al.</i> , 2015
<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>actinidiae</i>	<i>Actinidia deliciosa</i>	Aluminio	Monchiero <i>et al.</i> , 2015
Nematodos			
<i>Helicotylenchus</i> spp.	<i>Musa paradisiaca</i>	Potasio	Quintero-Vargas y Castaño-Zapata, 2012
<i>Heterodera avenae</i>	<i>Avena sativa</i>	Potasio	Oka <i>et al.</i> , 2007
<i>Meloidogyne marylandi</i>	<i>Triticum aestivum</i>	Potasio	Oka <i>et al.</i> , 2007
<i>Meloidogyne</i> spp.	<i>M. paradisiaca</i>	Potasio	Quintero-Vargas y Castaño-Zapata, 2012
<i>Pratylenchus bracyurus</i>	<i>Glycine max</i>	Potasio	Dias-Areira <i>et al.</i> , 2012
<i>Pratylenchus bracyurus</i>	<i>Zea mays</i>	Potasio	Dias-Areira <i>et al.</i> , 2012
<i>P. bracyurus</i>	<i>Zea mays</i>	Manganeso	Puerari <i>et al.</i> , 20015
<i>Radopholus similis</i>	<i>M. paradisiaca</i>	Potasio	Quintero-Vargas y Castaño-Zapata, 2012

EFICACIA

Los niveles de eficacia de los fosfitos en el control de organismos fitoparásitos varían dependiendo de: ión unido al fosfito, método de aplicación, organismo patógeno y planta hospedante (Cuadro 2; Figura 2); por ejemplo, la inmersión de frutos de mandarina en soluciones elaboradas con fosfito de calcio y potasio, sirvió para disminuir 50% de frutos dañados por moho verde de los cítricos, originado por *Penicillium digitatum* (Cerioni *et al.*, 2013); también, plantas de soya tratadas con fosfito de potasio mostraron hasta 50% menos daño por *Peronospora manshurica* en comparación con las plantas sin tratar (Silva *et al.*, 2011). Abbasi y Lazarovits (2006) reportan 80% menos plantas de pepino infectadas por *Pythium* spp. cuando las semillas fueron tratadas por inmersión en soluciones con fosfito de cobre. Ogoshi *et al.* (2013) obtuvieron disminución de 62.5% en la severidad de *Colletotrichum gloeosporioides* en plantas de café tratadas con fosfito de potasio. También, 93% de

Cuadro 2. Sensibilidad a fosfitos de patógenos en papa (Tomado de Lobato *et al.*, 2010).

Table 2. Pathogen sensitivity to phosphites in potato (Taken from Lobato *et al.*, 2010).

	Fosfito de calcio	Fosfito de potasio	Fosfito de cobre
Patógeno		mg mL ⁻¹	
<i>Phytophthora infestans</i>	0.09 ^x	0.15	<0.04
<i>Rhizoctonia solani</i>	1.87	>3.56	1.04
<i>Fusarium solani</i>	1.29	>3.56	0.68
<i>Streptomyces scabies</i>	0.83	1.99	0.22

^xConcentración del compuesto para inhibir el 50% de su crecimiento / ^xCompound concentration to inhibit 50% growth.

Compared with conventional synthetic fungicides, phosphites are usually less effective to reduce damages caused by phytopathogens. Méndez *et al.* (2010) were able to reduce the damage caused by *Pseudoperonospora cubensis* in melon plants treated with chlorothalonil and mancozeb, but not in those that were treated with potassium phosphite (Figure 3). Acímović *et al.* (2016) were also able to significantly reduce the incidence of *Erwinia*

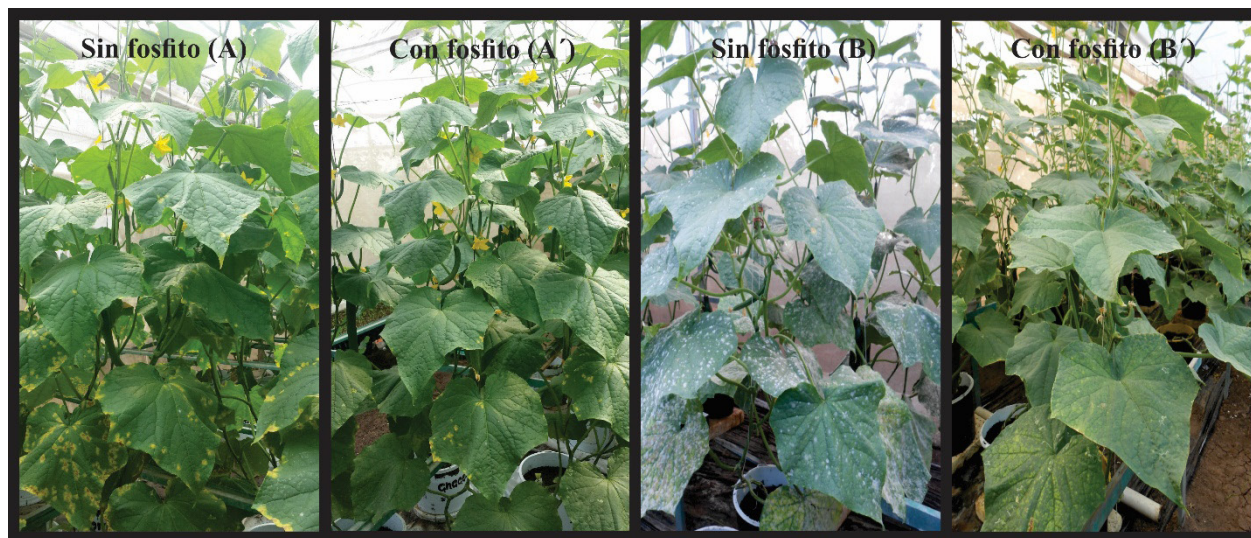


Figura 2. Incidencia y severidad de *Pseudoperonospora cubensis* (A y A') y *Sphaerotheca fuliginea* (B y B') en plantas de pepino cultivadas en invernadero.

Figure 2. Incidence and severity of *Pseudoperonospora cubensis* (A and A') and *Sphaerotheca fuliginea* (B and B') in cucumber plants cultivated in the greenhouse.

las plantas de papaya tratadas con fosfito de potasio sobrevivieron al ataque de *Phytophthora palmivora*, en contraste con el 24% de sobrevivencia de las plantas sin tratar (Vawdrey y Westerhuis, 2007).

En comparación con los fungicidas convencionales sintetizados, los fosfitos generalmente son menos eficaces para disminuir el daño por los patógenos que atacan plantas, al respecto Méndez *et al.* (2010) consiguieron que plantas de melón tratadas con clorotalonil y mancozeb, mostraran menor daño por *Pseudoperonospora cubensis* que aquellas que recibieron tratamiento con fosfito de potasio (Figura 3). También, Aćimović *et al.* (2016) lograron incidencia de *Erwinia amylovora* significativamente inferior con sulfato de estreptomycin, en comparación con la incidencia obtenida con fosfito de potasio, cuando esos compuestos se inyectaron al tallo de árboles de manzana (Figura 4). Meyer y Hausbeck (2013) reportaron disminución significativa en la incidencia de plantas de calabaza muertas

amylovora using streptomycin sulfate, compared with the incidence of the pathogen when they used potassium phosphite (Figure 4); the compounds were injected into apple tree trunks. Meyer and Hausbeck (2013) reported a significant decrease in the incidence of death squash plants infected by *Phytophthora capsici* when they were treated with fluopicolide, mandipropamid or dimethomorph fungicides, compared with the incidence of plants treated with potassium phosphite. In general, the reports on the effectiveness of phosphites and conventional fungicides in controlling phytoparasite organisms suggest that phosphites are less effective and could not replace fungicides at all, but that if they are included as part of an integrated pest management program they could help reduce the use of fungicides as well as the probability that the organisms develop resistance (Liljeroth *et al.*, 2016). Méndez *et al.* (2010) reported similar effectiveness against *Pseudoperonospora cubensis* in squash plants by alternately using chlorothalonil/

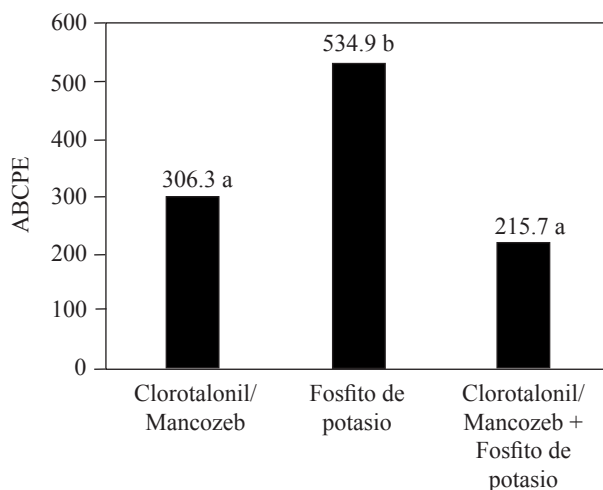


Figura 3. Promedio del área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) obtenido con el tratamiento para el combate de *Pseudoperonospora cubensis* en plantas de pepino (Elaboración de los autores con datos de Méndez *et al.*, 2010).

Figure 3. Average area under the progress curve (ABCPE) from a treatment against *Pseudoperonospora cubensis* in cucumber plants (Developed by the authors with data from Méndez *et al.*, 2010).

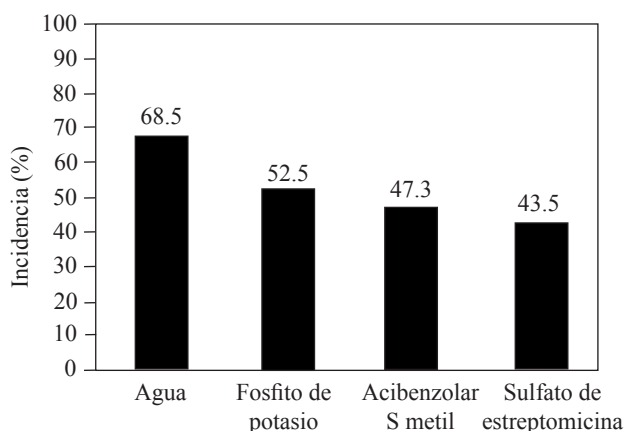


Figura 4. Control de *Erwinia amylovora* después de dos aplicaciones de inductor de resistencia o antibiótico, al tronco de árboles de manzana (Elaboración de los autores con datos de Aćimović *et al.*, 2016).

Figure 4. Control of *Erwinia amylovora* after two applications of a resistance inducer or antibiotics to trunks of apple trees (Developed by the authors with data from Aćimović *et al.*, 2016).

por *Phytophthora capsici*, cuando fueron tratadas con los fungicidas fluopicolide, mandipropamid o dimethomorph, en comparación con la incidencia registrada en las plantas tratadas con fosfito de potasio. En general, los reportes comparativos de la eficacia en el control entre los fosfitos y los fungicidas convencionales, indican que los primeros son menos eficaces y que no los podrían sustituir por completo, pero su integración como parte de un programa de manejo integrado puede permitir disminuir el uso de fungicidas y reducir la posibilidad de generar resistencia por los organismos (Liljeroth *et al.*, 2016). Al respecto, Méndez *et al.* (2010) determinaron eficacia similar en el combate de *Pseudoperonospora cubensis* en plantas de calabaza con clorotalonil/mancozeb y fosfito de potasio aplicados de manera alternada, comparada con la eficacia registrada cuando se utilizó únicamente los fungicidas (Figura 3). También, Liljeroth *et al.* (2016) reportaron que la protección contra *Phytophthora infestans* en papa, fue semejante cuando los fungicidas fluazinam, cyazofamida, mandipropamida, metalaxyl + fluazinam o fluopicolide + propamocarb, se usaron al 100% de la dosis recomendada o al 50% de la dosis en mezcla con fosfito de potasio.

MODO DE ACCIÓN

Los mecanismos de acción involucrados en los efectos profilácticos de los fosfitos incluyen acción directa e indirecta. Se ha determinado que el ion fosfito al entrar en contacto con los organismos fitopatógenos, afecta su crecimiento y reproducción al influir en la expresión de genes que codifican la síntesis de compuestos indispensables en la estructura y fisiología celular (acción directa). Además, al entrar a las células del tejido vegetal (acción indirecta) activa los mecanismos bioquímicos (producción de: polisacáridos, proteínas relacionadas con la patogénesis, fitoalexinas, etc.) y

mancozeb and potassium phosphite compared with the effectiveness when using only fungicides (Figure 3). Liljeroth *et al.* (2016) also reported that the protection against *Phytophthora infestans* in potato was similar using fluazinam, cyazofamid, mandipropamid, metalaxyl + fluazinam or fluopicolide + propamocarb at 100% of the recommended dose, or at 50% of the dose mixed with potassium phosphite.

ACTION MODE

The action mechanisms involved in the prophylactic effects of phosphites include direct and indirect action. It has been stated that when the phosphite ion come into contact with phytopathogen organisms, it affects their growth and reproduction, because it influences the expression of genes that encode the synthesis of essential compounds in their cell structure and physiology (direct action). When the phosphite ion enters the plant tissue cells (indirect action) activates biochemical (production of: polysaccharides, proteins related to pathogenesis, phytoalexins, etc.) and structural defense (such as callose deposition) mechanisms that restrict pathogens penetration and survival in the plant (Figure 5).

Direct action

The addition of phosphites to the medium culture reduced mycelium growth, as well as the number of spore-generating structures and of produced and germinated spores (Figure 6). Thus, with this practice, we observed a growth decrease of *Alternaria alternata* (Reuveni *et al.*, 2003), *Colletotrichum gloeosporioides* (Araujo *et al.*, 2010), *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* (Hofgaard *et al.*, 2010), *Mycosphaerella fijiensis* (Mogollón and Castaño, 2012), *Penicillium*

estructurales de defensa (como la deposición de calosa) que restringen la penetración y supervivencia de los patógenos en la planta (Figura 5).

Acción directa

Los fosfitos adicionados al medio de cultivo para organismos fitopatógenos, originaron que disminuyera el crecimiento del micelio, el número de estructuras generadoras de esporas, la cantidad de esporas producidas y su germinación (Figura 6). Así, mediante esa práctica se reportó disminución en el crecimiento de *Alternaria alternata* (Reuveni *et al.*, 2003), *Colletotrichum gloeosporioides* (Araujo *et al.*, 2010), *Fusarium culmorum* y *F. graminearum* (Hofgaard *et al.*, 2010), *Mycosphaerella*

digitatum (Cerioni *et al.*, 2013), *Phytophthora cinnamomi* (Wilkinson *et al.*, 2001; Won *et al.*, 2009; King *et al.*, 2010), *P. cinnamomi*, *P. palmivora* and *P. nicotianae* (Smillie *et al.*, 1989), *P. infestans* (Bórza *et al.*, 2014), *P. plurivora* (Dalio *et al.*, 2014) and *Pythium aphanidermatum*, *P. ultimum*, *P. irregulare*, *P. myriotylum*, *P. torulosum*, *P. volutum* and *P. graminicola* (Cook *et al.*, 2009). The decrease level in the microorganisms' growth as a consequence of the phosphite ion is determined by the organism tested, amount of phosphite added to the culture medium, type of ion bonded to phosphite and pH produced by the culture medium (Lobato *et al.*, 2010).

The susceptibility of the microorganisms to the phosphite ion was demonstrated by Wong *et*

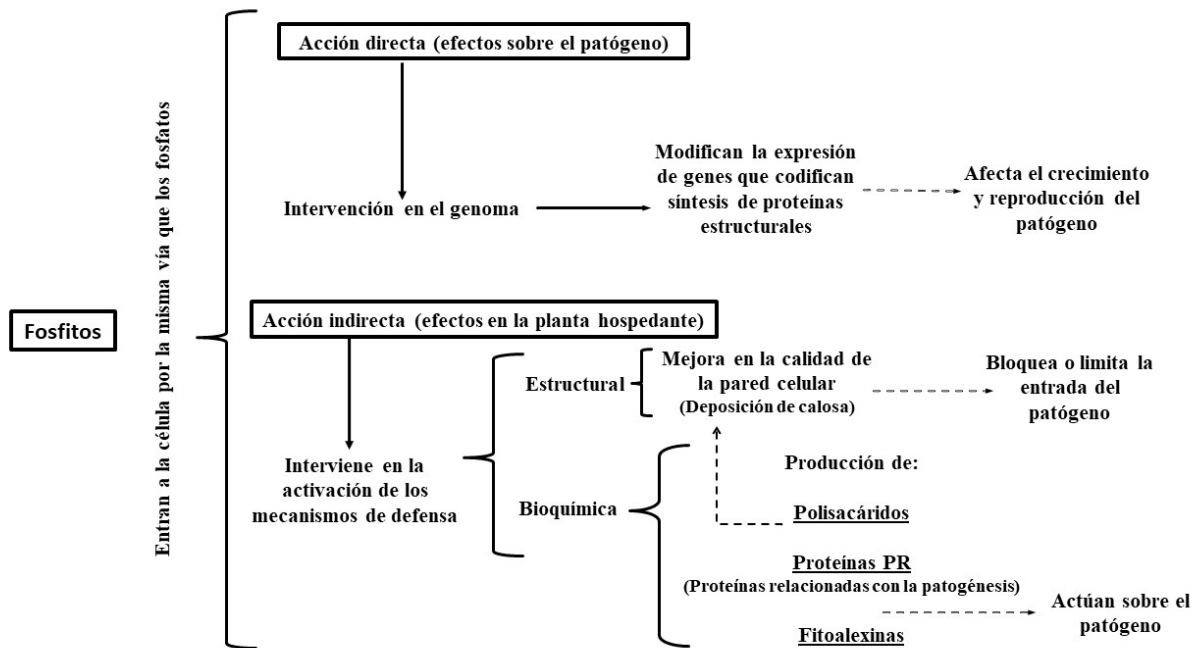


Figura 5. Modo de acción de los fosfitos, representación esquemática (Elaboración de los autores con datos de: Daniel y Guest, 2006; Jackson *et al.*, 2000; King *et al.*, 2010; Eshraghi *et al.*, 2011; Olivieri *et al.*, 2012; Cerioni *et al.*, 2013; Dalio *et al.*, 2014).

Figure 5. Action mode of phosphites, schematic representation (developed by the authors using data from Daniel and Guest, 2006; Jackson *et al.*, 2000; King *et al.*, 2010; Eshraghi *et al.*, 2011; Olivieri *et al.*, 2012; Cerioni *et al.*, 2013; Dalio *et al.*, 2014).

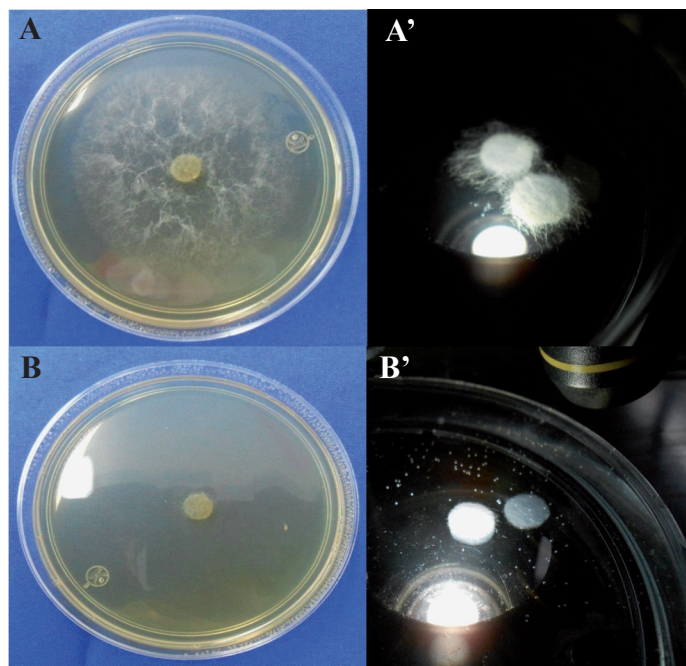


Figura 6. Crecimiento de *Pythium aphanidermatum* en medio de cultivo Papa-Dextrosa-Agar (izquierda) y agua destilada (derecha). A y A' sin fosfito de potasio; B y B' con fosfito de potasio.

Figure 6. *Pythium aphanidermatum* in Potato Dextrose Agar (PDA) culture medium (left) and distilled water (right). A and A' without potassium phosphite; B and B' with potassium phosphite.

fijiensis (Mogollón y Castaño, 2012), *Penicillium digitatum* (Cerioni *et al.*, 2013), *Phytophthora cinnamomi* (Wilkinson *et al.*, 2001; Won *et al.*, 2009; King *et al.*, 2010), *P. cinnamomi*, *P. palmivora* y *P. nicotianae* (Smillie *et al.*, 1989), *P. infestans* (Bórza *et al.*, 2014), *P. plurivora* (Dalio *et al.*, 2014) y *Pythium aphanidermatum*, *P. ultimum*, *P. irregulare*, *P. myriotylum*, *P. torulosum*, *P. volutum* y *P. graminicola* (Cook *et al.*, 2009). El grado de disminución en el crecimiento de los microorganismos como consecuencia del ion fosfito, está determinado por el organismo ensayado, la cantidad de fosfito agregado al medio de cultivo, el tipo de ion unido al fosfito y el pH que se origine en el medio de cultivo (Lobato *et al.*, 2010).

La susceptibilidad de los microorganismos al ion fosfito fue comprobada por Wong *et al.* (2009),

al. (2009), who determined the negative effect of phosphite and the positive effect of phosphate on *Phytophthora cinnamomic* growth, when grown in a culture medium enriched with salts containing each ion individually.

As for interspecific susceptibility, Hofgaard *et al.* (2010) were able to reduce *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* and *Microdochium majus* mycelium growth by 60, 80 and 90%, respectively, using 10 $\mu\text{l ml}^{-1}$ of potassium phosphite. To inhibit *Phytophthora infestans in vitro* growth, Lobato *et al.* (2010) used a lower dose, followed by the dose used to inhibit *Streptomyces scabies*, *Rhizoctonia solani* and *Fusarium solani* growth.

The intraspecific susceptibility was studied by Wilkinson *et al.* (2001), who determined that from 21 *Phytophthora cinnamomi* isolates collected

quienes determinaron el efecto negativo de fosfito y el positivo de fosfato sobre el crecimiento de *Phytophthora cinnamomi*, cuando creció en medio de cultivo enriquecido con sales que contenían cada ion de manera individual.

En relación a la susceptibilidad interespecífica, Hofgaard *et al.* (2010) obtuvieron disminuciones de 60, 80 y 90% en el crecimiento del micelio de *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* y *Microdochium majus*, respectivamente, con 10 $\mu\text{l ml}^{-1}$ de fosfito de potasio. Lobato *et al.* (2010) determinaron que para inhibir el crecimiento *in vitro*, la dosis menor se empleó para *Phytophthora infestans*, seguida de la usada para inhibir a *Streptomyces scabies*, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium solani*.

La susceptibilidad intraespecífica fue estudiada por Wilkinson *et al.* (2001), quienes determinaron que de 21 aislamientos de *Phytophthora cinnamomi* colectados en el oeste de Australia, 9% resultaron susceptibles a fosfito de potasio, 82% mostraron susceptibilidad intermedia y 9% fueron tolerantes. Smillie *et al.* (1989) determinaron la susceptibilidad de *Phytophthora cinnamomi*, *P. palmivora* y *P. nicotiana* a fosfito de potasio, explicando además que a medida que la concentración de fosfito se incrementó en el medio de cultivo, disminuyó el peso de la biomasa producida por las tres especies de *Phytophthora*. También Cook *et al.* (2009) evaluaron la concentración necesaria de fosfito y el fungicida mefenoxan, para inhibir el 50% del crecimiento del micelio de ocho aislamientos de *Pythium aphanidermatum*, y reportaron que todos los aislamientos fueron susceptibles a los dos compuestos, pero que las concentraciones de fosfito utilizadas fueron mayores que las del fungicida.

Por otro lado, el ion fosfito disminuyó el pH en el medio de cultivo a niveles de acidez que se relacionaron con menor crecimiento de *Phytophthora infestans*, *Rhizoctonia solani*, *Fusarium solani* y *Streptomyces scabies* (Lobato *et al.*, 2010). Araujo *et*

in western Australia, 9% were susceptible, 82% intermediate susceptible and 9% tolerant. Smillie *et al.* (1989) showed *Phytophthora cinnamomi*, *P. palmivora* and *P. nicotiana* susceptibility to potassium phosphite, and explained that as the concentration of phosphite increased in the culture medium, the weight of the biomass produced by *Phytophthora* species decreased. Cook *et al.* (2009) also evaluated the concentration of phosphite and mefenoxan fungicide needed to inhibit 50% mycelium growth of eight *Pythium aphanidermatum* isolates, and reported that all the isolates were susceptible to both compounds, but that the concentrations of phosphite were higher than those of the fungicide.

On the other hand, the phosphate ion reduced pH in the culture medium at acidity levels that were associated with *Phytophthora infestans*, *Rhizoctonia solani*, *Fusarium solani* and *Streptomyces scabies* low growth (Lobato *et al.*, 2010). Araujo *et al.* (2010) reported a larger decrease in the diameter of *Colletotrichum gloeosporioides* colonies as well as in the growth speed index using formulations containing potassium phosphite, which reduced pH in the medium culture. Also, potassium phosphite affected *Alternaria alternata* (Reuveni *et al.*, 2003), *Colletotrichum gloeosporioides* (Ogoshi *et al.*, 2013), *Penicillium digitatum* (Cerioni *et al.*, 2013), *P. expansum* (Amiri and Bompeix, 2011) and *Peronospora parasitica* (Becót *et al.*, 2000) spore germination, as well as *Fusarium oxysporum* f sp. *cubense* (Davis and Grant, 1996), *Mycosphaerella fijiensis* (Mogollón y Castaño, 2012), *Peronospora sparsa* (Hukkanen *et al.*, 2008), *Phytophthora plurivora* (Dalio *et al.*, 2014) and *P. cinnamomi* (Wong *et al.*, 2009) spore production.

The effect of phosphites added to a medium culture was explained by King *et al.* (2010), who reported changes induced by potassium phosphite

al. (2010) reportaron mayor disminución del diámetro de las colonias y el índice de velocidad de crecimiento de *Colletotrichum gloeosporioides*, con formulaciones de fosfito de potasio que originaron mayor disminución del pH en el medio de cultivo. Además, fosfito de potasio afectó la germinación de esporas de *Alternaria alternata* (Reuveni *et al.*, 2003), *Colletotrichum gloeosporioides* (Ogoshi *et al.*, 2013), *Penicillium digitatum* (Cerioni *et al.*, 2013), *P. expansum* (Amiri y Bompeix, 2011) y *Peronospora parasitica* (Becót *et al.*, 2000); así como la producción de esporas de *Fusarium oxysporum* f sp. *cubense* (Davis y Grant, 1996), *Mycosphaerella fijiensis* (Mogollón y Castaño, 2012), *Peronospora sparsa* (Hukkanen *et al.*, 2008), *Phytophthora plurivora* (Dalio *et al.*, 2014) y *P. cinnamomi* (Wong *et al.*, 2009).

El efecto de los fosfitos agregados al medio de cultivo fue explicado por King *et al.* (2010), quienes reportaron modificación inducida por fosfito de potasio en la expresión de genes que codifican la síntesis de proteínas que constituyen la pared y el citoesqueleto de las células de *Phytophthora cinnamomi*, lo que originó distorsión de hifas y lisis de pared celular.

Acción indirecta

La acción indirecta del ión fosfito incluye la estimulación de los mecanismos de defensa estructural y bioquímica en las plantas; así, Pilbeam *et al.* (2011) describieron deposición de lignina y suberina alrededor del tejido dañado por *Phytophthora cinnamomi* en plantas de eucalipto tratadas con fosfito de potasio, efecto que limitó el desarrollo del patógeno. También Olivieri *et al.* (2012) refirieron aumento en el contenido de pectina en el tejido de la peridermis y la corteza, en tubérculos procedentes de plantas de papa tratadas con fosfito de potasio, condición que mejora la resistencia a

in the expression of the genes that encode protein synthesis and builds *Phytophthora cinnamomi* cells and cytoskeleton, which caused hyphae distortion and cell wall lysis.

Indirect action

The indirect action of the phosphite ion includes stimulation of structural and biochemical defense mechanisms in plants. Pilbeam *et al.* (2011) described lignin and suberine deposition around tissue damaged by *Phytophthora cinnamomi* in eucalyptus plants treated with potassium phosphite, which limited the pathogen's development. Olivieri *et al.* (2012) reported an increased pectin content in periderm and cortex tissue and tubers from potato plants treated with potassium phosphite, a feature that improves resistance to different pathogens. Jackson *et al.* (2000) reported that the development of lesions caused by *P. cinnamomi* was highly restricted when they applied a high concentration of phosphite in *Eucalyptus marginata* tissue, and that the reduced number of lesions was associated with a significant increase of defense enzymes (4-coumarate coenzyme A ligase (4CL) and cinnamyl-alcohol dehydrogenase) and soluble phenols. Daniel and Guest (2006) demonstrated that when *Arabidopsis thaliana* plantlets were treated with potassium phosphite and inoculated with *Phytophthora palmivora* zoospores, the infected cells showed increased cytoplasmic activity, development of cytoplasmic aggregates, release of hydrogen peroxide, located cell death, and enhanced phenolic compounds accumulation. Eshraghi *et al.* (2011) also reported that when *Arabidopsis thaliana* plantlets were treated with potassium phosphite and inoculated with *Phytophthora cinnamomi*, the infected cells increased their production of calose and hydrogen peroxide.

diversos patógenos. Jackson *et al.* (2000) reportaron que el desarrollo de lesiones por *P. cinnamomi* fue altamente restringido, cuando la concentración de fosfito en el tejido de *Eucalyptus marginata* fue alta y la disminución en el desarrollo de lesiones se asoció con un aumento significativo de las enzimas de defensa (4-coumarato coenzima A ligasa y deshidrogenasa de alcohol cinnamyl) y de fenoles solubles. Daniel y Guest (2006) demostraron que en plántulas de *Arabidopsis thaliana*, tratadas con fosfito de potasio e inoculadas con zoosporas de *Phytophthora palmivora*, las células infectadas aumentaron la actividad citoplasmática, el desarrollo de agregados citoplasmáticos, la liberación de peróxido de hidrógeno, muerte celular localizada y mejoraron la acumulación de compuestos fenólicos. Eshraghi *et al.* (2011) también reportaron que en plántulas de *Arabidopsis thaliana*, tratadas con fosfito de potasio e inoculadas con *Phytophthora cinnamomi*, la producción de calosa y de peróxido de hidrógeno se incrementó en las células infectadas.

CONCLUSIONES

Los fosfitos son compuestos eficaces para el control de protozoarios, oomycetes, hongos, bacterias y nematodos fitoparásitos, sin embargo, en comparación con los fungicidas convencionales sintetizados suelen ser menos eficaces. Los niveles de eficacia de los fosfitos para resolver problemas fitopatológicos están en relación con: organismo problema, planta hospedante e ion unido al fosfito. Por su eficiente translocación en tejido vegetal, se pueden suministrar al follaje, tallos, raíces o frutos. Los mecanismos de acción involucrados en los efectos profilácticos de los fosfitos son diversos e incluyen la estimulación de los mecanismos de defensa bioquímica y estructural en las plantas, además de la acción directa que restringe el crecimiento,

CONCLUSIONS

Phosphites are effective compounds to control protozoa, oomycetes, fungi, bacteria and phytoparasite nematodes, but compared with synthetic conventional fungicides, they tend to be less effective. The effectiveness level of phosphites to solve phytopathological problems is associated with the problem organism, the host plant and the ion bonded to phosphite. Because of its efficient translocation in plant tissue, they can be applied to canopy, stems, roots or fruits. The action mechanisms involved in the prophylactic effects of phosphites are diverse and include the stimulation of biochemical and structural defense mechanisms in plants, besides the direct action that limits phytoparasite organisms' growth, development and reproduction. Integrating phosphites as part of a phytopathological problems management program allows to reduce the number of fungicide applications as well as the probability that the organisms develop resistance.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

desarrollo y reproducción de los organismos fitoparásitos. La integración de los fosfitos como parte de un programa de manejo de problemas fitopatológicos permite disminuir el número de aplicaciones de fungicidas y reducir la posibilidad de generar resistencia por los organismos fitoparásitos.

## LITERATURA CITADA

Abbasi PA and Lazarovits G. 2006. Seed treatment with phosphonate (AG3) suppresses *Pythium* damping-off of cucumber seedlings. *Plant Disease* 90:459-464. <https://doi.org/10.1094/PD-90-0459>

- Achary VMM, Ram B, Manna M, Datta D, Bhatt A, Reddy M and Agrawal PR. 2017. Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal* 1-16. <https://doi.org/10.1111/pbi.12803>
- Acimović SG, Zeng Q, McGhee GC, Sundin GW and Wise JC. 2015. Control of fire blight (*Erwinia amylovora*) on apple trees with trunk-injected plant resistance inducers and antibiotics and assessment of induction of pathogenesis-related protein genes. *Front. Plant Science* 6:1-6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00016>
- Acimović SG, VanWoerkom AH, Garavaglia T, Vandervoort C, Sundin GW and Wise JC. 2016. Seasonal and cross-seasonal timing of fungicide trunk injections in apple trees to optimize management of apple scab. *Plant Disease* 100:1606-1616. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-15-1061-RE>
- Akinsanmi OA and Drenth A. 2013. Phosphite and metalaxyl rejuvenate macadamia trees in decline caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Crop Protection* 53:29-36. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.007>
- Alexandersson E, Mulugeta T, Lankinen Å, Liljeroth E and Andreasson E. 2016. Plant resistance inducers against pathogens in *Solanaceae* species-from molecular mechanisms to field application. *International Journal Molecular Sciences* 17:1-25. <https://doi.org/10.3390/ijms17101673>
- Amiri A and Bompeix G. 2011. Control of *Penicillium expansum* with potassium phosphite and heat treatment. *Crop Protection* 30:222-227. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.10.010>
- Anderson JM, Pegg KG, Scott C and Drenth A. 2012. Phosphonate applied as a pre-plant dip controls *Phytophthora cinnamomi* root and heart rot in susceptible pineapple hybrids. *Australasian Plant Pathology* 41:59-68. <https://doi.org/10.1007/s13313-011-0090-6>
- Araújo L, Valdebenito-Sanhueza RM and Stadnik MJ. 2010. Avaliação de formulações de fosfito de potássio sobre *Colletotrichum gloeosporioides in vitro* e no controle pós-infecional da mancha foliar de *Glomerella* em macieira. *Tropical Plant Pathology* 35:54-59. <http://www.scielo.br/pdf/tpp/v35n1/a10v35n1>
- Becót S, Pajot E, Le Corred D, Monot C and Silué D. 2000. Phytogard ( $K_2HPO_3$ ) induces localized resistance in cauliflower to downy mildew of crucifers. *Crop Protection* 19:417-425. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00034-X)
- Bock CH, Brenneman TB, Hotchkiss MW and Wood BW. 2012. Evaluation of a phosphite fungicide to control pecan scab in the southeastern USA. *Crop Protection* 36:58-64. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.01.009>
- Borin RC, Possenti JC, Rey MS, Bernardi C and Mazaro SM. 2017. Phosphites associated to fungicides for diseases control and sanity in corn seeds. *Applied Research and Agrotechnology* 10:83-92. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V10.N1.09>
- Borza T, Peters RD, Wu Y, Schofield A, Rand J, Ganga Z, Al-Mughrabi KI, Coffin RH and Wang-Pruski G. 2017. Phosphite uptake and distribution in potato tubers following foliar and postharvest applications of phosphite-based fungicides for late blight control. *Annals of Applied Biology* 1:127-139. <https://doi.org/10.1111/aab.12322>
- Borza T, Schofield A, Sakthivel G, Bergese J, Gao X, Rand J and Wang-Pruski G. 2014. Ion chromatography analysis of phosphite uptake and translocation by potato plants: dose-dependent uptake and inhibition of *Phytophthora infestans* development. *Crop Protection* 56:74-81. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.024>
- Cerioni L, Rapisarda VA, Doctor J, Fikkert S, Ruiz T, Fassel R and Smilanick JL. 2013. Use of phosphite salts in laboratory and semicommercial tests to control citrus postharvest decay. *Plant Disease* 97:201-212. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-03-12-0299-RE>
- Cook PJ, Landschoot PJ and Schlossberg MJ. 2009. Inhibition of *Pythium* spp. and suppression of Pythium blight of turfgrasses with phosphonate fungicides. *Plant Disease* 93:809-814. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-8-0809>
- Costa BHG, De Resende MLV, Ribeiro PM, Mathioni SM, Padua MS and Da Silva MJB. 2014. Suppression of rust and brown eye spot diseases on coffee by phosphites and by-products of coffee and citrus industries. *Journal of Phytopathology* 162:635-642. <https://doi.org/10.1111/jph.12237>
- Dalio RJD, Fleischmann F, Humez M and Osswald W. 2014. Phosphite protects *Fagus sylvatica* seedlings towards *Phytophthora plurivora* via local toxicity, priming and facilitation of pathogen recognition. *PLoS One* 9, e87860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087860>
- Daniel R and Guest D. 2006. Defence responses induced by potassium phosphonate in *Phytophthora palmivora*-challenged *Arabidopsis thaliana*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 67:194-201. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2006.01.003>
- Davis AJ and Grant GR. 1996. The effect of phosphonate on the sporulation of *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*. *Australasian Plant Pathology* 25:31-35. <https://doi.org/10.1071/AP96007>
- Dias-Arieira CRP, Marini PM, Fontana LF, Roldi M and Silva TRB. 2012. Effect of *Azospirillum brasilense*, Stimulate® and potassium phosphite to control *Pratylenchus brachyurus* in soybean and maize. *Nematropica* 42:170-175. <http://journals.fcla.edu/nematropica/article/view/79597/76915>
- Deliopoulos T, Kettlewell PS and Hare MC. 2010. Fungal disease suppression by inorganic salts: a review. *Crop Protection* 29:1059-1075. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.05.011>
- Eshraghi L, Anderson J, Aryamanesh N, Shearer B, McComb J, Hardy GES and O'Brien PA. 2011. Phosphite primed defence responses and enhanced expression of defence genes in *Arabidopsis thaliana* infected with *Phytophthora cinnamomi*. *Plant Pathology* 60:1086-1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02471.x>
- Förster H, Adaskaveg JE, Kim DH and Stanghellini ME. 1998. Effect of phosphite on tomato and pepper plants and on susceptibility of pepper to *Phytophthora* root and crown rot in hydroponic culture. *Plant Disease* 82:1165-1170. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1998.82.10.1165>
- Gómez-Merino FC and Trejo-Téllez LI. 2015. Biostimulant activity of phosphite in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196:82-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.035>
- Hardy GES, Barrett S and Shearer BL. 2001. The future of phosphite as a fungicide to control the soilborne plant pathogen *Phytophthora cinnamomi* in natural ecosystems.

- Australians Plant Pathology 30:133-139. <https://doi.org/10.1071/AP01012>
- Hofgaard IS, Ergon A, Henriksen B and Tronsmo AM. 2010. The effect of potential resistance inducers on development of *Microdochium majus* and *Fusarium culmorum* in winter wheat. European Journal of Plant Pathology 128:269-281. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9662-5>
- Hukkanen A, Kostamo K, Kärenlampi S and Kokko H. 2008. Impact of agrochemicals on *Peronospora sparsa* and phenolic profiles in three *Rubus arcticus* cultivars. Journal of Agricultural and Food Chemistry 56:1008-1016. <https://doi.org/10.1021/jf072973p>
- Jackson TJ, Burgess T, Colquhoun I and Hardy GESTJ. 2000. Action of the fungicide phosphite on *Eucalyptus marginata* inoculated with *Phytophthora cinnamomi*. Plant Pathology 49:147-154. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2000.00422.x>
- Kammerich J, Beckmann S, Scharafat I and Ludwig-Müller J. 2014. Suppression of the clubroot pathogen *Plasmodiophora brassicae* by plant growth promoting formulations in roots of two *Brassica* species. Plant Pathology 63:846-857. <https://doi.org/10.1111/ppa.12148>
- King M, Reeve W, Van der Hoek M.B, Williams N, McComb J, O'Brien PA and Hardy GE. 2010. Defining the phosphite-regulated transcriptome of the plant pathogen *Phytophthora cinnamomi*. Mol Genet Genomics 284:425-35. <https://doi.org/10.1007/s00438-010-0579-7>
- Kromann P, Pérez WG, Taïpe A, Schulte-Geldermann E, Sharma BP, Andrade-Piedra JL and Forbes GA. 2012. Use of phosphonate to manage foliar potato late blight in developing countries. Plant Disease 96:1008-1015. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PDIS-12-11-1029-RE>
- Lai T, Wang Y, Fan Y, Zhou Y, Bao Y and Zhou T. 2017. The response of growth and patulin production of postharvest pathogen *Penicillium expansum* to exogenous potassium phosphite treatment. International Journal of Food Microbiology 244:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.12.017>
- Liljeroth E, Lankinen Å, Wiik L, Burra DD, Alexandersson E and Andreasson E. 2016. Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials. Crop Protection 86:42-55. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.04.003>
- Lobato MC, Machinandierena MF, Tambascio C, Dosio GAA, Caldiz DO, Dalio GR, Andreu AB and Olivieri FP. 2011. Effect of foliar applications of phosphite on post-harvest potato tubers. European Journal Plant Pathology 130:155-163. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9741-2>
- Lobato MC, Olivieri FP, González AEA, Wolski EA, Daleo GR, Caldiz DO and Andreu AB. 2008. Phosphite compounds reduce disease severity in potato seed tubers and foliage. European Journal Plant Pathology 122:349-358. <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9299-9>
- Lobato MC, Olivieri FP, Daleo GR and Andreu AB. 2010. Antimicrobial activity of phosphites against different potato pathogens. Journal Plant Disease Protection 3:102-109. <https://doi.org/10.1007/BF03356343>
- Lovatt CJ and Mikkelsen RL. 2006. Phosphite fertilizers: what are they? Can you use them? What can they do? Better Crops 90:11-13. [https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/\\$webindex/3EF696A6E5851563852572140026EACD/\\$file/06-4p11.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/bcrops.nsf/$webindex/3EF696A6E5851563852572140026EACD/$file/06-4p11.pdf)
- MacKenzie SJ, Mertely JC and Peres NA. 2009. Curative and protectant activity of fungicides for control of crown rot of strawberry caused by *Colletotrichum gloeosporioides*. Plant Disease 93:815-820. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-8-0815>
- Manna M, Achary VMM, Islam T, Agrawal PK and Reddy MK. 2016. The development of a phosphite-mediated fertilization and weed control system for rice. Scientific Reports 6:1-13. <https://doi.org/10.1038/srep24941>
- McDonald AE, Grant BR and Plaxton WC. 2001. Phosphite (phosphorous acid): its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. Journal Plant Nutrition 24:1505-1519. <http://dx.doi.org/10.1081/PLN-100106017>
- Méndez LW, Arauz LF y Ríos R. 2010. Evaluación de fungicidas convencionales e inductores de resistencia para el combate de mildiú vellosa (*Pseudoperonospora cubensis*) en melón (*Cucumis melo*). Agronomía Costarricense 34:153-164. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/3629/3534>
- Meyer MD and Hausbeck MK. 2013. Using soil-applied fungicides to manage *Phytophthora* crown and root rot on summer squash. Plant Disease 97:107-112. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-11-1071-RE>
- Mofidnakhai M, Abdossi V, Dehestani A, Pirdashti H and Babaeizad V. 2016. Potassium phosphite affects growth, antioxidant enzymes activity and alleviates disease damage in cucumber plants inoculated with *Pythium ultimum*. Archives of Phytopathology and Plant Protection 49:207-221. <http://dx.doi.org/10.1080/03235408.2016.1180924>
- Mogollón AM y Castaño J. 2012. Evaluación *in vitro* de inductores de resistencia sobre *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. Revista Facultad Nacional de Agronomía 65:6327-6336. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179924340004>
- Monchiero M, Lodovica MG, Pugliese M, Spadaro D and Garibaldi A. 2015. Efficacy of different chemical and biological products in the control of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* on kiwifruit. Australasian Plant Pathology 44:13-23. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0328-1>
- Monsalve V, Viteri RSE, Rubio CNJ and Tovar DF. 2012. Efectos del fosfito de potasio en combinación con el fungicida metalaxyl + mancozeb en el control de mildiú vellosa (*Peronospora destructor* Berk) en cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.). Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín 65:6317-6325. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179924340003>
- Nascimento KJT, Araujo L, Resende RS, Schurt DA, Silva WL and Rodrigues FA. 2016. Silicon, acibenzolar-S-methyl and potassium phosphite in the control of brown spot in rice. Bragantia 75:212-221. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.281>
- Ogoshi C, de Abreu MS, da Silva BM, Neto HS, Júnior PMR and de Resende MLV. 2013. Potassium phosphite: a promising product in the management of diseases caused by *Colletotrichum gloeosporioides* in coffee plants. Bioscience Journal 29:1558-1565. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/17148/13302>

- Oka Y, Tkachi N and Mor M. 2007. Phosphite inhibits development of the nematodes *Heterodera avenae* and *Meloidogyne marylandi* in cereals. *Phytopathology* 97:396-404. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-4-0396>
- Olivieri FP, Feldman ML, Machinandiarena MF, Lobato MC, Caldiz DO, Dalo GR and Andreu AB. 2012. Phosphite applications induce molecular modifications in potato tuber periderm and cortex that enhance resistance to pathogens. *Crop Protection* 32:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.08.025>
- Oyarburo NS, Machinandiarena MF, Feldman ML, Daleo GR, Andreu AB and Olivieri FP. 2015. Potassium phosphite increases tolerance to UV-B in potato. *Plant Physiology and Biochemistry* 88:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.01.003>
- Pagani APS, Dianese AC and Cafê-Filho AC. 2014. Management of wheat blast with synthetic fungicides, partial resistance and silicate and phosphite minerals. *Phytoparasitica* 42:609-617. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0401-x>
- Percival GC, Noviss K and Haynes I. 2009. Field evaluation of systemic inducing resistance chemicals at different growth stages for the control of apple (*Venturia inaequalis*) and pear (*Venturia pirina*) scab. *Crop Protection* 28:629-633. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.03.010>
- Pilbeam RA, Howard K, Shearer BL and Hardy GEJ. 2011. Phosphite stimulated histological responses of *Eucalyptus marginata* to infection by *Phytophthora cinnamomi*. *Tree* 25:1121-1131. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0587-1>
- Pinto KM, Do Nascimento C, Gomes EC, Da Silva HF and Miranda J. 2012. Efficiency of resistance elicitors in the management of grapevine downy mildew *Plasmopara viticola*: epidemiological, biochemical and economic aspects. *European Journal Plant Pathology* 134:745-754. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0050-1>
- Puerari HH, Dias-Arieira CR, Cardoso MR, Hernandez I and Brito ODC. 2015. Resistance inducers in the control of root lesion nematodes in resistant and susceptible cultivars of maize. *Phytoparasitica* 43:383-389. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0447-9>
- Quintero-Vargas C y Castaño-Zapata J. 2012. Evaluación de inductores de resistencia para el manejo de nematodos fitoparásitos en plántulas de plátano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 36:575-586. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v36n141/v36n141a08.pdf>
- Rebollar-Alviter A, Wilson LL, Madden LV and Ellis MA. 2010. A comparative evaluation of post-infection efficacy of mefenoxam and potassium phosphite with protectant efficacy of azoxystrobin and potassium phosphite for controlling leather rot of strawberry caused by *Phytophthora cactorum*. *Crop Protection* 29:349-353. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.009>
- Reuveni M, Sheglov D and Cohen Y. 2003. Control of moldy-core decay in apple fruits by  $\beta$ -aminobutyric acids and potassium phosphites. *Plant Disease* 87:933-936. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.8.933>
- Silva OC, Santos HAA, Dalla-Pria M and May-De Mio LL. 2011. Potassium phosphite for control of downy mildew of soybean. *Crop Protection* 30:598-604. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.02.015>
- Smillie R, Grant BR and Guest D. 1989. The mode of action of phosphite: evidence for both direct and indirect modes of action on three *Phytophthora* spp. in plants. *Phytopathology* 79:921-926. <https://doi.org/10.1094/Phyto-79-921>
- Tkaczyk M, Kubiak KA, Sawicki J, Nowakowska JA and Oszako T. 2016. The use of phosphates in forestry. *Forest Research Papers* 77:76-81. <https://doi.org/10.1515/frp-2016-0009>
- Vawdrey LL and Westerhuis D. 2007. Field and glasshouse evaluations of metalaxyl, potassium phosphonate, acibenzolar and tea tree oil in managing *Phytophthora* root rot of papaya in far northern Queensland, Australia. *Australasian Plant Pathology* 36:270-276. <https://doi.org/10.1071/AP07016>
- Wilkinson CJ, Holmes JM, Tynan KM, Colquhoun IJ, McComb JA, Hardy GESTJ and Dell B. 2001. Ability of phosphite applied in a glasshouse trial to control *Phytophthora cinnamomi* in five plant species native to Western Australia. *Australasian Plant Pathology* 30:343-351. <https://doi.org/10.1071/AP01055>
- Wong MA, McComb BJ, Hardy BGEJ and O'Brien PA. 2009. Phosphite induces expression of a putative proteophosphoglycan gene in *Phytophthora cinnamomi*. *Australasian Plant Pathology* 38:235-241. <https://doi.org/10.1071/AP08101>
- Yáñez JMG, Ayala TF, Partida RL, Velázquez AT, Godoy ATP y Díaz VT. 2014. Efecto de bicarbonatos en el control de cenicilla (*Oidium* sp.) en pepino (*Cucumis sativus* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:991-1000. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342014000600007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000600007)
- Yáñez JMG, León DJF, Godoy ATP, Gastélum LR, López MM, Cruz OJE y Cervantes DL. 2012. Alternativas para el control de la cenicilla (*Oidium* sp.) en pepino (*Cucumis sativus* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:259-270. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263123201004>