

CONTROL BIOLÓGICO DE MALEZAS: UN ENFOQUE MICROBIOLÓGICO

BIOLOGICAL CONTROL OF WEEDS: A MICROBIOLOGICAL APPROACH

*Jhoandys Royet-Barroso*¹

1. Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Agrícolas, Maestría en Ciencias Agronómicas, Diagnostico y Manejo Integrado de Malezas. Tel: 3215919099. Jhoandys25@hotmail.com.

RESUMEN

Las malezas actúan al mismo nivel trópico que los cultivos y comparten o toman nutrientes y recursos útiles para el desarrollo de las plantas y el buen rendimiento de los cultivos, causando pérdidas entre 30 y 40%. Los métodos de control químico, mecánico y físico han sido la base para el manejo de malezas, sin embargo estas prácticas son económicamente inviables y puede desencadenar problemas de resistencia. No obstante, la agricultura moderna continúa con la búsqueda de nuevos métodos de control no convencionales destinados a la utilización de enfoques biológicos de control de malezas. Por esta razón, el objetivo del trabajo fue realizar una revisión bibliográfica de los diferentes agentes fitopatógenos usados en la agricultura moderna para el control de malezas. Los resultados de investigaciones han mostrado que los géneros fungosos *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Phoma*, *Phomopsis*, *Puccinia* y *Sclerotium*. Las bacterias del género *Xanthomonas*, *Pseudomonas* y los virus *Sowbane mosaic virus (SoMV)*, *Pepino mosaic virus (PEPMV0)*, *Obuda pepper virus* y *Araujia Mosaic Virus (ARJMV0)*, tienen potencial como agentes de control biológico de malezas, debido a que tienen la capacidad de producir fitotoxinas que son capaces de reducir la producción de biomasa, inhiben la germinación de semillas, reducir la capacidad fotosintética de las malezas, sin afectar los cultivos de interés. Esto indica que existe gran diversidad de agentes de control biológico que proporcionan la posibilidad de explorar nuevas alternativas eficientes y amigables con el ambiente para el manejo integrado de malezas.

Palabras claves: Bioherbicidas, Fitotoxinas, Agentes de biocontrol, fitopatógenos.

1. INTRODUCCIÓN

Las malezas actúan al mismo nivel trópico que los cultivos y comparten o toman nutrientes y recursos útiles para el desarrollo de las plantas y el buen rendimiento de los cultivos. Los daños cuantitativos causados por las malezas son el resultado de su competencia por el agua, la luz y los nutrientes destinados a los cultivos y esto finalmente conduce a una reducción en el rendimiento de los cultivos (Pacanoski, 2006; Trognitz et al., 2016). Se ha evidenciado que cultivos como algodón, arroz, maíz, soja y papa presentan pérdidas de 36%, 37%, 40%, 37% y 30%, respectivamente (Oerke, 2006).

Los métodos de control químico, mecánico y físico han sido la base para el manejo de malezas, especialmente en entornos agrícolas (Kelton y Price 2009). Sin embargo, los métodos de control convencionales no son económicamente viables por un tiempo prolongado o para el manejo de malezas en áreas remotas o en grandes extensiones de tierras de propiedad pública con bajo valor agrícola (Culliney, 2005). Por lo tanto, continúa la búsqueda de nuevos métodos de control de malezas no convencionales destinados a la utilización de enfoques biológicos de control de malezas. El control biológico de malezas se define en términos generales como el uso de un agente, un complejo de agentes o procesos biológicos para provocar la supresión de las malezas. Todas las formas de organismos macrobianos y microbianos se consideran agentes de control biológico, como artrópodos (insectos y ácaros), patógenos de plantas (hongos, bacterias, virus y nematodos), peces, pájaros y otros animales (WSSA, 2019).

Hay muchas razones para usar el control biológico en la Malherbología, como la restricción en uso de muchos herbicidas comunes debido a problemas tales como regulaciones estrictas o la evolución de la resistencia a los herbicidas en las malezas; cambiar la comprensión en el control de malezas, como apuntar solo a especies no deseadas, conservar áreas ambientalmente sensibles o propensas a la degradación, evitar la contaminación debido a productos químicos; e inclinación a sistemas de cultivo más saludables y sostenibles (Wilgen et al., 2013; Radhakrishnan et al., 2018; Schwarzländer et al., 2019)

Además, el control biológico se considera más barato y autosuficiente si los organismos liberados se establecen con éxito (Goeden y Andres, 1999; Charudattan, 2005; Uludag et al., 2018).

El control biológico usando microorganismos patógenos de plantas ha sido ampliamente estudiado, el primer reporte documentado de la liberación de un hongo para el biocontrol de una maleza ocurrió en 1971, cuando *Puccinia chondrillina* se introdujo en Australia para el control de *Chondrilla juncea* (Julien y Griffiths, 1998). Hasta la fecha, se han registrado oficialmente más de 20 fitopatógenos con capacidad herbicida y se han introducido al menos 15 nuevos agentes de biocontrol clásicos (Schwarzländer et al., 2018).

Winston et al (2014) en su libro “Control biológico de malezas: un catálogo mundial de agentes y sus malezas objetivo” reportan diferentes géneros de microorganismos usados para el control de malezas, entre los que se destacan *Alternaria*, *Chondrostereum*, *Colletotrichum*, *Cylindrobasidium*, *Phoma*, *Phytophthora*, *Puccinia*, *Pseudomonas* y *Xanthomonas*. No obstante, los investigadores, se encuentran en la búsqueda e identificación de nuevos patógenos para la producción de moléculas bioactivas con actividad herbicida, como es el caso de géneros fungosos como *Diaporthe*, *Fusarium*, *Sclerotium* y especies de bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* (Sousa et al., 2017; Stocco et al., 2018; Zhang et al., 2019; Lawrance et al., 2019). La aplicación de bacterias, hongos y virus como bioherbicidas ha recibido una atención cada vez mayor en las últimas tres décadas. Por esta razón, el objetivo del siguiente trabajo es realizar un revisión de los diferentes agentes fitopatógenos usados en la agricultura moderna para el control de malezas.

2. CONTROL BIOLÓGICO DE MALEZAS

El control biológico de las malezas es un enfoque del uso de organismos vivos o sus productos para reducir la población, el crecimiento, la reproducción y el impacto de las malezas en los cultivos (Charudattan, 2005). El objetivo del control biológico es que los agentes usados se establezcan en su nuevo entorno y aumenten en abundancia a niveles que causen daños suficientes a las malezas para reducir su competitividad, producción reproductiva y crecimiento de la población (McFadyen 1998). A diferencia de las demás prácticas de control de malezas, los organismos de control biológico representan un riesgo insignificante para la salud humana, evitan el problema de la resistencia, y reducen la necesidad de intervenciones repetida, no contaminan el medio ambiente, son energéticamente eficientes, menos costosos, biodegradables y no dejan residuos tóxicos (Goeden y Andres, 1999; Wilgen et al., 2013; Uludag et al., 2018). Los enemigos naturales pueden reducir las poblaciones de malezas en los hábitats invadidos a los niveles que se encuentran en el rango de hogar natural. Esto puede conducir a la restauración del equilibrio ecológico y la biodiversidad. Los agentes de biocontrol controlan directamente las malas hierbas al interferir con la fisiología de las plantas y destruir sus partes vitales o indirectamente al hacer que las plantas sean más susceptibles a enfermedades y otras plagas (Bellows y Headrick, 1999).

3. BIOHERBICIDAS

El control de malezas en la agricultura moderna se ha basado en los herbicidas, pero casi ningún nuevo modo de acción de los herbicidas ha sido explorado. Los bioherbicidas desarrollados a partir de plantas superiores, microorganismos o fitotoxinas microbiológicas (Lamberth, 2016; Cai y Gu, 2016) se han utilizado para controlar las malezas en sistemas agrícolas (Cordeau et al., 2016; Dayan et al., 2012). El caso de las fitotoxinas producidas por los patógenos de las malezas son una herramienta eficaz para diseñar bioherbicidas naturales y seguros. Su uso podría evitar el de plaguicidas sintéticos que causan resistencia en las plantas

hospederas y el impacto a largo plazo de los residuos en los productos agrícolas con riesgo para la salud humana y animal (Cimmino et al., 2015).

El modo de acción de los bioherbicidas a partir de microorganismos patógenos es similar a los mecanismos de interacción planta-patógeno (Trognitz et al., 2016). Si bien los términos patogenicidad y virulencia describen la capacidad de un patógeno de causar enfermedad de manera cualitativa y cuantitativa, el término compatibilidad aborda el resultado de una interacción. Una interacción compatible huésped-patógeno se basa en el establecimiento exitoso de una relación parasitaria (De Silva et al., 2017). Los genes involucrados en el establecimiento de una interacción compatible pueden desempeñar un papel en diferentes niveles de patogénesis, en el reconocimiento del huésped, la morfogénesis relacionada con la infección (formación de apresorios o haustorios, estructuras de infección hemibiotróficas y necrotróficas), degradación de los componentes de la célula huésped y absorción y utilización de nutrientes (Agrios, 2005; De Silva et al., 2017). Por lo tanto, los factores de compatibilidad podrían ser enzimas que degradan las paredes celulares, facilitando la entrada del microorganismo y las fitotoxinas o metabolitos secundarios, que pueden interferir en el metabolismo de la planta (Ghorbani et al., 2005; Stergiopoulos et al., 2013; Harding y Raizada, 2015 ;Cordeau et al., 2016). Para que un bioherbicida sea eficiente de presentar alta virulencia contra las plantas objetivo, el establecimiento de altas poblaciones en plantas hospedantes, la facilidad de producción y almacenamiento, la formulación adecuada y la seguridad de las especies no objetivo (Pacanoski, 2015). En general, se ha considerado que los bioherbicidas no pueden actuar como sustitutos de los herbicidas sintéticos, pero pueden ser una herramienta suplementaria en el control de malezas (Boyette et al., 2008).

4. CONTROL BIOLÓGICO DE MALEZAS CON PATÓGENOS

4.1. HONGOS Y OOMYCETES

La producción de un bioherbicida a partir de hongos fitopatógenos requiere una serie de pasos, desde la selección, aislamiento, evaluación del potencial bioherbicida, actividad enzimática, identificación molecular y formulación final (Souza et al., 2017; Junior et al., 2019).

Los géneros *Alternaria*, *Chondrostereum*, *Colletotrichum*, *Curvularia*, *Dactylaria*, *Diaporthe*, *Drechslera*, *Exserohilum*, *Fusarium*, *Gloeocercospora*, *Microsphaeropsis*, *Mycoleptodiscus*, *Myrothecium*, *Phoma*, *Phomopsis*, *Plectosporium*, *Puccinia*, *Pyricularia*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Sclerotinia*, *Serratia*, *Stagonospora*, *Trichoderma* y *Verticillium* han sido registrados como agentes bioherbicidas que inhiben la germinación de semillas y el crecimiento de malezas (Winston et al 2014; Klaić et al., 2015; Radhakrishnan et al., 2018) Estos patógenos producen fitotoxinas fúngicas que desempeñan un papel importante en la inducción de síntomas de enfermedades que interfieren con los procesos fisiológicos de la planta huésped. Aunque los patógenos fúngicos representan un gran obstáculo para la producción agraria y para el patrimonio forestal y medioambiental, también pueden representar una alternativa ecológica a la gestión de las malezas (Cimmino et al., 2015).

De los géneros fúngicos mencionados anteriormente, *Colletotrichum* ha tenido gran impacto como agente biocontrolador de malezas, este se ha estudiado durante muchos años, llevándose a cabo experimentos en invernadero y laboratorio con los hongos *Colletotrichum graminicola* (Cg) y *Gloeocercospora sorghi* (Gs) para el control de *Sorghum* spp, y se evidenció que las aplicaciones secuenciales intraespecíficas (Cg + Cg o Gs + Gs) e interespecíficas (Cg + Gs o Gs + Cg) con 1 o 7 días de diferencia indicaron interacciones antagónicas en el porcentaje de pérdida de biomasa. Aplicación de cualquier hongo con, o 1-3 días antes de, una concentración subletal de glifosato resultó en un porcentaje antagónico de pérdida de biomasa; mientras que la aplicación de glifosato antes

de cualquier bioherbicida potencial resultó en una respuesta sinérgica de la enfermedad de las malezas (Mitchell et al., 2008).

Según Makowski (1998), las especies de *C. gloeosporioides* f. sp. *malvae* son efectivas para controlar la malva de hoja redonda (*Malva pusilla*). La penetración y el periodo latente se evaluaron bajo condiciones controladas en cultivos de campo, con el objetivo de identificar el rango de hospederos (trigo, lino, lentejas, mostaza, semillas de colza, remolacha azucarera, girasol, cártamo) y en las Malváceas (okra y algodón). Los resultados mostraron que en los cultivos hubo poca germinación, formación de apresorios o penetración de *C. gloeosporioides* en comparación con la infección que ocurrió en la maleza. El patógeno penetra directamente las cutículas de las plantas y produce estructuras de infección dentro de las células epidérmicas 31–36 h después de la inoculación. La infección involucra vesículas intracelulares, hifas primarias de gran diámetro que se contraen en los sitios de penetración transcelular e hifas secundarias (Morin et al., 1996). Otras especies como *C. truncatum* y *C. gloeosporioides* se han investigado como bioherbicidas prometedores contra la problemática hierba *Sesbania exaltata* (Silmar et al., 1993; Schisler et al., 1991; Boyette et al., 2010; Bowling et al., 2010).

Dauch et al (2003) usando marcadores moleculares de diagnóstico, generados a partir de ADN polimórfico amplificado al azar (RAPD) y utilizados en la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), detectaron selectivamente la presencia de *Colletotrichum coccodes* considerado como un bioherbicida potencial para el control selectivo de *Abutilon theophrasti*. Investigadores buscan mejorar la virulencia de *C. coccodes* mediante inhibidores de los mecanismos de defensa de las plantas, sobreexpresando el gen *oah A* (oxaloacetato acetilhidrolasa) para aumentar la producción de oxalato, ya que este inhibe la callosa sintasa defensiva de las plantas al quelar el calcio, un cofactor obligatorio de esta enzima, por tanto la planta se vuelve más susceptible al ataque del patógeno. Con esto se podría obtener una mayor optimización mediante el apilamiento de genes o la adición de múltiples genes de virulencia a este potencial agente de biocontrol (Ahn et al., 2005; Meir et al 2009). Otros métodos para aumentar la virulencia de

Colletotrichum es el uso de aceites de soya y girasol para el control de *Aeschynomene virginica* (Sandrin et al., 2003).

Una investigación de los genomas de *C. gloeosporioides* y *C. orbiculare*, encontraron que ambas especies contenían una cantidad de genes candidatos que se predice que están asociados con la patogénesis, incluidas las enzimas degradantes de la pared celular de las plantas y los efectores de enfermedades secretadas, incluidas las pequeñas proteínas secretadas (SSP), las cuales se demostró que estas últimas se expresan de manera diferencial en planta de acuerdo con la etapa de infección, lo que sugiere que algunas de estas proteínas pueden tener funciones específicas en el proceso de infección (Gan et al., 2013). También existe evidencia de que ambas especies de *Colletotrichum* tienen la capacidad de producir ácido acético indol (Gan et al., 2013), una hormona vegetal, cuyos derivados son plantillas de herbicidas bien establecidas (Grossmann, 2010).

Distintas especies del género *Phoma* presentan actividad bioherbicida. Varios aislamientos de *Phoma macrostoma* fueron patentados por causar clorosis severa y muerte a varias especies de malezas de hoja ancha comunes y económicamente importantes incluido el cardo canadiense (*Cirsium arvense*), diente de león (*Taraxacum officinale*), pamplina (*Stellaria media*) y manzanilla sin aroma (*Matricaria perforata*) (Bailey y Derby, 2001). Los conidios de *P. macrostoma* no son efectivos como unidades infecciosas cuando se aplican en suspensión conidial o gránulos que contengan conidios y luego sean depositados en el suelo. El efecto biocontrolador se obtiene cuando el micelio es aplicado pre emergente o post-emergente al suelo; este coloniza las raíces de la plantas los primeros 7 días después de la aplicación. El hongo ingresa a los hospedadores en sitios proximales a los pelos radiculares y crece intercelularmente hacia el núcleo de la raíz y prolifera alrededor de la tráquea vascular, interrumpiendo la competencia de las células vecinas. En cebada (*Hordeum vulgare*) la proliferación es restringida por las capas externas y no hay alteración de la estructura celular interna, por tanto este hongo presenta un potencial como bioherbicida para controlar malezas de hoja ancha susceptibles, pero no daña a los hospedantes no objetivo resistentes (Bailey et al., 2011).

Otras especies como *Phoma exigua* var. *exigua* y *Phoma macrostoma* producen citocalasinas como macrocidinas y fomachalasinas que inducen clorosis en especies de plantas susceptibles al interferir con la biosíntesis de carotenoides; las macrocidinas inhiben la enzima fitoeno desaturasa (PDS) y probablemente actúan sobre otros componentes de la vía biocinética de carotenoides. Las citocalasas se unen a la actina e impiden su polimerización y elongación. Por ello, repercuten en la morfología celular e inhiben procesos celulares como la división celular y la síntesis de proteínas (Evidente et al., 2011; Hubbard et al., 2016). El fraccionamiento bioguiado de los extractos de filtrado de cultivo de *Phoma herbarum* causaron una inhibición significativa del crecimiento de radícula de plántulas de plumas de príncipe (*Amaranthus hypochondriacus*) (Rivero-Cruz et al., 2000). Con el objetivo de reemplazar los herbicidas sintéticos por bioherbicidas y buscar estrategias que sean menos agresivas para el medio ambiente, se formuló un bioherbicida con metabolitos de *Phoma* sp. y se encontró que combinando adyuvantes con filtrado de cultivo de *Phoma* sp. mostró eficacia fitotóxica contra *Bidens pilosa*, *Amaranthus retroflexus* y *Conyza canadensis* (Zhang et al., 2003; Todero et al., 2018)

Especies del género *Alternaria*, como *A. alternata*, *A. Cassiae*, *A. Crassa* y *A. destruens* han sido evaluadas para el control de malezas como *Echinochloa* spp., *Cuscuta* spp., *Senna obtusifolia* (Pitelli y Amorin, 2003; Motlagh, 2012; Cook et al., 2009). La cepa 059 de *Alternaria destruens* se registró en la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en 2005 bajo los nombres de productos Smolder WP y Smolder G. Este producto, originalmente aislado de *Cuscuta gronovii* que crece en condiciones no gestionadas en Wisconsin (Cook et al., 2009), sin embargo, no está disponible comercialmente (Bailey, 2014). Estas especies producen ácido tenuazónico que reduce la longitud de las raíces y de los brotes de las plántulas, además inhibe la germinación en semillas de *Ageratina adenophora*, *Striga hermonthica* y *Echinochloa* sp. (Motlagh, 2012). El ácido tenuazónico causa lesiones de color marrón en muchas plantas, y luego mata rápidamente las plántulas de las malezas monocotiledóneas y dicotiledóneas. Los estudios de modo de acción revelaron que es un nuevo inhibidor natural de la fotosíntesis que

interrumpe principalmente el transporte de electrones del fotosistema II (PSII); causando necrosis de las células de las plantas por daño oxidativo (Cimmino et al., 2015).

El control biológico ha sido evaluado en las especies de coquito como *Cyperus rotundus* L. y *Cyperus esculentus* L., utilizando el hongo de la roya *Puccinia canaliculata* (Schw.) Lagerh. (Phatak et al., 1983, 1987). Según Okoli et al (1997) existe susceptibilidad diferencial de los biotipos *Cyperus* sp. a *Puccinia canaliculata*. En un intento por comprender la posible base genética de esta diferencia, se utilizó el análisis RAPD (ADN polimórfico amplificado al azar) para estudiar la variación genética dentro de colecciones de *Cyperus rotundus* y *Cyperus esculentus* muestras obtenidas de diferentes ubicaciones geográficas y se evidenció que existe diferencia entre los genotipos de *Cyperus* sp. Estos resultados tienen implicaciones para el control biológico de estas especies de malezas. Un enfoque para el control biológico de las malezas es aliviar la competencia entre el cultivo y la maleza induciendo y estimulando epidemias de un patógeno en la maleza. *Senecio vulgaris* es una maleza problemática en horticultura que es tolerante o resistente a una variedad de herbicidas y, por lo tanto, es candidato para el control biológico. Los resultados de experimentos de campo mostraron que una epidemia del hongo de la roya *Puccinia lagenophorae* redujo las pérdidas en el apio del cultivo (*Apium graveolens*) y zanahoria (*Daucus carota*) al inducir la enfermedad en la maleza *S. vulgaris* (Frantzen, 2000; Grace y Müller, 2003; Frantzen y Müller; 2006). *Puccinia thlaspeos* se ha registrado bajo el nombre de producto Woad por el control de la hierba pastel (*Isatis tinctoria*). Las especies de este género son parásitos obligados y requieren un huésped vivo para reproducirse, por tanto, es difícil de reproducir en medios de cultivo, no obstante se puede producir a partir de material vegetal seco y molido de su maleza objetivo (Thomson y Kropp, 2004).

La especie *Fusarium oxysporum* agente causal de enfermedades devastadoras en cultivos de importancia económica, ha sido estudiada como alternativa biológica para el control de malezas. La forma especial *orthoceras*, fue evaluada para el control de la hierba parásita de la raíz (*Orobanche cumana*) en el girasol. La

germinación de las semillas inoculadas se redujo significativamente, el hongo penetra y coloniza semillas latentes de *O. cumana*. Los tubos germinales de microconidios penetraron en todas las partes de la testa de semillas. Las hifas disolvieron las paredes celulares del endospermo y metabolizaron el citoplasma, que era rico en cuerpos lipídicos y proteicos (Thomas et al., 1999).

Connick et al (1991) desarrollaron una pasta, mediante el cual los propágulos fúngicos se encapsulan (atrapan) en una masa preparada a partir de harina de trigo y agua, luego los hongos se enrollaban en una lámina delgada, se secaba al aire y se molía en gránulos. Con esta técnica se evaluaron los agentes micoherbicidas *Alternaria cassiae*, *A. crassa*, *Colletotrichum truncatum* y *Fusarium lateritium* contra las malezas *Abutilon theophrasti*, *Cassia obtusifolia*, *Datura estramonia*, *Sesbania exaltata* y se encontró que los gránulos de 0.6 a 1.40 mm (malla 14-18 y malla 18-30) que contienen las dos especies de *Alternaria* o *Colletotrichum* causó niveles más altos de mortalidad de malezas (68–100%) que los gránulos más pequeños (25–40%). Cuando los gránulos contenían *F. lateritium*, la mortalidad de las malezas fue $\leq 30\%$ independientemente del tamaño del gránulo. No obstante, Shabana et al (2003) realizaron una modificación de la formulación de la pasta encontrándose que las más efectivas fueron la pasta 14 (que contiene clamidosporas [PC] con extracto de levadura, glicerol y sacarosa). Pasta 1 (que contiene microconidios [PM] con extracto de levadura y sacarosa), Pasta 5 (PM con extracto de levadura, glicerol y sacarosa), Pasta 7 (PM con alginato de sodio como aditivo) y Pasta 15 (PC con stillage). Estas formulaciones produjeron 99, 98, 98, 97 y 97% en el desarrollo de la enfermedad respectivamente, y causaron una reducción en la biomasa de *Orobanche cumana* en 80, 76, 71, 80 y 67%, respectivamente.

Investigadores en Sudán realizaron ensayos para evaluar el efecto micoherbicida de aislados de *Fusarium nygamai* y *Fusarium* sp sobre la hierba parásita (*Striga hermonthica*) y encontraron que la mayor eficacia de control se logró mediante la aplicación de *F. nygamai* en gránulos "Pasta" a 1,5 g por hoyo de plantación, lo que redujo el número total de brotes de parásitos en un 82% y el número de brotes sanos en un 88% en comparación con los no tratados controlar (Abbasher et al.,

1992; Zahran et al., 2008). Sin embargo en el oeste de Kenia *Fusarium oxysporum* f. sp. La cepa *Strigae* Foxy 2 no logró el control sobre *Striga hermonthica* (Avedi et al., 2014)

La aplicación de una suspensión de esporas de *F. oxysporum* en suelo (técnica líquida) mostró que a los tres meses se había producido la muerte del total de las plantas de *Sorghum halepense*, mientras que con la técnica de infestación del suelo con un cultivo sólido del patógeno (técnica sólida) a los 90 días sólo había muerto el 65% de las plantas. *F. oxysporum* no disminuyó el porcentaje de germinación de los cultivos de soja, girasol, sorgo granífero y maíz, por lo que este hongo podría utilizarse como agente de biocontrol, sin embargo, es necesario conocer el rango de hospedantes del patógeno para poder evaluar los riesgos de usar este antagonista (Stocco et al., 2018).

El género *Fusarium* produce tricotecenos, una clase importante de metabolitos secundarios tóxicos para las plantas y los mamíferos. Los tricotecenos son una familia de sustancias sesquiterpenoides tetracíclicas producidas por varias especies de hongos, todos estos han demostrado ser inhibidores potentes de la germinación de semillas. Se conocen más de 100 compuestos y causan una amplia variedad de efectos biológicos debido a la diversidad de las estructuras químicas dentro del grupo. Estas micotoxinas han sido evaluadas para el control de malezas como *Ulex europaeus*, *Cytisus scoparius*, *Cucumis sativus*, *Sorghum bicolor*, *Papaver somniferum* (Morin et al., 2000; Abbas et al., 2013; Saremi et al., 2018; Daniel et al., 2018).

Las nuevas perspectivas para el control de malezas, se enfoca en la utilización hongos autóctonos con potencial bioherbicida selectivo. En este sentido, Souza et al (2017) aislaron 39 hongos de la maleza *Cucumis sativus* L. en Brazil de los cuales 28 presentaron presentaron algunos síntomas fitotóxicos contra la planta objetivo. Además la cepa VP51 perteneciente al género *Diaporthe* mostró la actividad herbicida más pronunciada. El bioherbicida basado en SC64 aislado del hongo *Sclerotium rolfsii* tiene el potencial de controlar *Solidago canadensis* de forma continua y eficiente (Tang et al., 2011, Tang et al., 2013). Se evaluó el

efecto de este hongo y glifosato para el control de *S. canadenses*. Los resultados mostraron que a los 180 días, el tratamiento con bioherbicidas produjo un 89,61% de control de malezas en promedio en cada sitio de prueba, mientras que el herbicida químico causó un 70,06% de control de malezas en promedio. En el tratamiento con bioherbicidas, se observaron aumentos significativos en el número total de especies locales de malezas, el índice de valor de importancia (IVI) de *S. canadensis* disminuyó en un 70.5 y 67.7% en la primavera y el otoño, respectivamente. Estos resultados mostraron que el tratamiento con bioherbicidas causó aumentos significativos en la importancia ecológica, es decir, riqueza, diversidad y uniformidad, las tasas de aumento promedio fueron significativamente más altas que las del tratamiento con herbicidas químicos. En conclusión, en comparación con los herbicidas químicos, el bioherbicida basado en SC64 mejoró significativamente la estructura de la comunidad de malezas y aumentó drásticamente la biodiversidad en los hábitats invadidos por *S. canadensis* (Zhang et al., 2019). Un bioherbicida final que vale la pena mencionar es DeVine, una formulación del hongo *Phytophthora palmivora* (Kenney, 1986). Este producto se registró con la EPA en 1981 y nuevamente en 2006 (Bailey, 2014). *P. palmivora* se aisló originalmente de la vid estranguladora (*Morrenia odorata*) en Florida y se usó para controlar la misma especie en huertos de cítricos (Ridings, 1986).

4.2. BACTERIAS

La cantidad de hongos usados como agentes de control de malezas es alto en comparación con la cantidad de bacterias (Boyetchko et al., 2002). Sin embargo, las bacterias presentan algunas ventajas sobre los hongos, incluyendo el rápido crecimiento, requisitos de propagación relativamente simples y mayor modificación genética mediante mutagénesis o transferencia de genes (Johnson et al., 1996; Li et al., 2003). Las primeras bacterias fitopatógenas estudiadas para el control de malezas fueron *Pseudomonas syringae* pv. *tagetis* usada para el control del Cardo de Canadá (*Cirsium vulgare*) y *Xanthomonas campestris* pv. *poannu* para el control de el pasto azul anual (*Poa annua* L.) y pasto bermuda (*Cynodon dactylon*

L. Pers.) (Johnson y Wyse, 1991; Johnson, 1994). A partir de estos estudios se han realizado diferentes investigaciones enfocadas en la identificación de cepas bacterianas que puedan ser usadas como posibles agentes biológicos para el control de malezas. Por esta razón, Mazzola et al (1992) informaron que la cepa *Pseudomonas putida* FH160, la cepa *Stenotrophomonas maltophilia* FH131 y la cepa *Enterobacter taylorae* FH650, suprimen el crecimiento de Bromo suave (*Bromus tectorum* L.).

Entre los estudios sobre los efectos supresores de *Pseudomonas fluorescens*, se han investigado tres cepas con gran detalle, y se ha observado que inhiben el crecimiento y / o la germinación de las plantas mediante la producción de metabolitos extracelulares (Kennedy et al., 1991 ; Codorniz et al., 2002; Banowetz et al., 2008). Se demostró que cinco cepas de bacterias nocivas de la rizosfera, principalmente *Pseudomonas fluorescens* cepa WH6 secretan un herbicida natural que detiene la germinación de las semillas de malezas de una manera específica, bloqueando irreversiblemente el proceso de germinación inmediatamente después de la aparición de la plúmula y coleoptilo. Debido a su modo de acción único, este herbicida se ha denominado factor de detención de la germinación (GAF) (Banowetz et al., 2008; Banowetz et al., 2009). El componente activo de GAF se identificó mediante espectroscopía de resonancia magnética nuclear y espectrometría de masas como 4-formilaminooxi-L-vinilglicina (McPhail et al., 2010). Se ha publicado la secuencia del genoma de la cepa WH6 de *P. fluorescens* (Kimbrel et al., 2010), y se utilizaron genes inactivos para identificar varios genes biosintéticos y reguladores involucrados en la producción de GAF / 4-formilaminooxi-L-vinilglicina (Halgren et al., 2013 ; Okrent et al., 2014).

Juan et al (2014) caracterizaron una cepa bacteriana con actividad herbicida altamente efectiva, esta fue aislada de hojas de maíz (*Zea mays* L) infectadas y mediante la morfología, pruebas fisiológicas, bioquímicas y los métodos de secuenciación del gen del ADN ribosómico 16S, se identificó la especie *Pseudomonas aeruginosa*. Otros autores evidenciaron el potencial de esta especie bacteriana e identificaron diferentes cepas como la CB-4, H6, C1501 y C1136, las cuales el extracto crudo mostraron una alta actividad de inhibición en *Pennisetum*

purpureum, *Oryza sativa*, *Pisum sativa*, *Amaranthus spinosum*, *Momordica charantia*, *Digitaria sanguinalis*. El compuesto activo que producen las cepas bacterianas se identificó mediante métodos espectroscópicos combinados (técnicas de RMN 1D y 2D) como un 2- (hidroximetil) fenol (Juan et al., 2014; Lawrence et al., 2019; Adetunji et al., 2018; Adetunji et al., 2019).

La otra especie bacteriana que ha recibido mucha atención como agente candidato para el control biológico de malezas es *Xanthomonas campestris*. Para seleccionar un agente de control biológico para *Poa annua* se evaluaron 14 aislamientos de *X. campestris* y se determinó su patogenicidad sobre especies de pastos no objetivo como *Agrostis palustris* y *Poa pratensis*. Se encontró que un aislado, JT-P482, era el patógeno más efectivo de la maleza y no produjo síntoma en los céspedes deseables. La concentración celular óptima utilizada en estos experimentos fue 10^8 UFC / ml en un volumen de aplicación de 100–400 ml / m². Este patógeno fue registrado en Japón en 1997 con el nombre de Camperico (Imaizumi et al., 1997; Imaizumi et al., 1999; Tateno, 2000).

En una investigación realizada por Mingzhi et al (2007) aislaron y caracterizaron una fitotoxina a partir de *X. campestris* pv. *retroflexo*. El retroflexo se aisló usando un cromatógrafo y HPLC, y se identificó que los componentes eran una mezcla de compuestos moleculares menores que incluyen ácidos orgánicos y ciclo- (prolina-fenilalanina). Este compuesto mostró eficiencia para el control de especies dicotiledóneas como *Amaranthus retroflexus* L

Se estudiaron los efectos de los parámetros ambientales sobre la actividad bioherbicida de la bacteria *Xanthomonas campestris*, contra *Conyza canadensis* resistente al glifosato en condiciones de invernadero. Los resultados indican que las plantas en la etapa de la hoja de roseta fueron más susceptibles que las plantas más viejas, el aumento del inóculo de 10^5 a 10^9 células / ml y un período de rocío a 25°C puede causar una mortalidad del 80% y 60% de las malezas (Boyette y Hoagland, 2015).

4.3. VIRUS

Los virus que afectan a las especies de malezas también se han considerado candidatos a bioherbicidas (Harding y Raizada, 2015). Esta estrategia se considera más comúnmente para el manejo de especies invasoras en ecosistemas más amplios en lugar de áreas específicamente manejadas. Se investigó el efecto de la infección por *Sowbane mosaic virus* (SoMV), los factores de luz, temperatura y condiciones de almacenamiento sobre la germinación y la viabilidad de las semillas de *Chenopodium album* L., *C. murale* L. y *C. quinoa* Willd. Se afirmó que la germinación y la viabilidad de las semillas de *Chenopodium* spp se redujo considerablemente (Kazinczi et al. 2000). También se observó una reducción leve, pero significativa en la viabilidad de las semillas de *Solanum nigrum* derivadas de plantas infectadas por Tobacco mosaic virus (TMV) (Kazinczi et al. 2002).

Otros virus con potencial para controlar especies de malezas incluyen Pepino mosaic virus (PEPMV0) y Obuda pepper virus (OBPV00) para el control *Solanum nigrum* L (Kazinczi et al., 2006), Tobacco mild green mosaic virus (TMGMV) usado para el control de *Solanum viarum* en Florida (Ferrell et al., 2008 ; Diaz et al., 2014) y Araujia Mosaic Virus (ARJMV0) para el control de *Araujia hortorum* en Nueva Zelanda (Elliott et al., 2009).

Para usar virus como agentes de control de malezas se debe tener en cuenta que estos agentes infecciosos presentan alta variabilidad genética y un amplio rango de huéspedes, por tanto, pueden afectar plantas no objetivos o de interés (Kazinczi et al., 2006). No obstante, los virus pueden reducir fuertemente la producción de biomasa, la producción de semillas, la resistencia a la sequía, la eficiencia fotosintética y la absorción de nutrientes de las especies de malezas (KAZINCZI et al. 2001).

5. CONCLUSION

En la agricultura moderna se está priorizando la producción de alimentos con la menor huella medioambiental posible, por esta razón se deben adoptar técnicas de control biológico de malezas, con el objetivo de minimizar los desafíos que plantean los métodos convencionales como sostenibilidad de los recursos agrícolas, la seguridad del medio ambiente y la salud humana. Una buena alternativa para el control de malezas, el uso de bioherbicidas microbianos, ya que se ha evidenciado que estos patógenos tienen la capacidad de prevenir las poblaciones de malezas, inhibir la germinación de semillas, disminuyen el crecimiento, la eficiencia fotosintética y la absorción de nutrientes de las malezas, además reducen la necesidad de intervenciones repetida, no contaminan el medio ambiente, son fáciles de propagar, son energéticamente eficientes, menos costosos, biodegradables y no dejan residuos tóxicos. A pesar de todas las ventajas que tienen estos bioherbicidas, se debe tener en cuenta no remplazarán las herbicidas de síntesis química, sino que son una alternativa a tener en cuenta durante las prácticas de manejo integrado de malezas, sin embargo la demanda de bioherbicidas ha aumentado y es necesario seguir investigando para identificar y caracterizar nuevos agentes de control biológico para mejorar la acción de los agentes existentes y también para optimizar los procesos de producción.

6. BIBLIOGRAFIAS.

- Abbas, H. K., Yoshizawa, T., & Shier, W. T. (2013). Cytotoxicity and phytotoxicity of trichothecene mycotoxins produced by *Fusarium* spp. *Toxicon*, 74, 68-75.
- Abbasher, A. A., & Sauerborn, J. (1992). *Fusarium nygamai*, a potential bioherbicide for *Striga hermonthica* control in sorghum. *Biological Control*, 2(4), 291-296.
- Adetunji, C. O., Oloke, J. K., & Osemwegie, O. O. (2018). Environmental fate and effects of granular pest formulation from strains of *Pseudomonas aeruginosa* C1501 and *Lasiodiplodia pseudotheobromae* C1136 on soil activity and weeds. *Chemosphere*, 195, 98-107.
- Adetunji, C. O., Oloke, J. K., Bello, O. M., Pradeep, M., & Jolly, R. S. (2019). Isolation, structural elucidation and bioherbicidal activity of an eco-friendly bioactive 2-(hydroxymethyl) phenol, from *Pseudomonas aeruginosa* (C1501) and its ecotoxicological evaluation on soil. *Environmental technology & innovation*, 13, 304-317.
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Academic press,.
- Ahmet Uludag, Ilhan Uremis, Mehmet Arslan (2018). *Biological Weed Control, Non-Chemical Weed Control*, Academic Press, Pages 115-132, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809881-3.00007-3>.
- Ahn, B., Paulitz, T., Jabaji-Hare, S., & Watson, A. (2005). Enhancement of *Colletotrichum coccodes* virulence by inhibitors of plant defense mechanisms. *Biocontrol science and technology*, 15(3), 299-308.
- Avedi, E. K., Ochieno, D. M., Ajanga, S., Wanyama, C., Wainwright, H., Elzein, A., & Beed, F. (2014). *Fusarium oxysporum* f. sp. *strigae* strain Foxy 2 did not achieve biological control of *Striga hermonthica* parasitizing maize in Western Kenya. *Biological control*, 77, 7-14.
- Bailey, K. L. (2014). The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens. *Integrated Pest Management*, 245–266. doi:10.1016/b978-0-12-398529-3.00014-2

- Bailey, K.L., Derby, J., 2001. Fungal isolates and biological control compositions for the control of weeds. US Patent Application, Serial No. 60/294,475, Filed May 20, 2001
- Bailey, KL, Pitt, WM, Leggett, F., Sheedy, C. y Derby, J. (2011). Determinación del proceso de infección de *Phoma macrostoma* que conduce a la actividad bioherbicida en malezas de hoja ancha. *Control biológico* , 59 (2), 268-276.
- Banowitz, G. M., Azevedo, M. D., Armstrong, D. J., & Mills, D. I. (2009). Germination arrest factor (GAF): Part 2. Physical and chemical properties of a novel, naturally occurring herbicide produced by *Pseudomonas fluorescens* strain WH6. *Biological Control*, 50(2), 103-110.
- Banowitz, G. M., Azevedo, M. D., Armstrong, D. J., Halgren, A. B., and Mills, D. I. (2008). Germination-Arrest Factor (GAF): biological properties of a novel, naturally-occurring herbicide produced by selected isolates of rhizosphere bacteria. *Biol. Control* 46, 380–390. doi: 10.1016/j.biocontrol.2008.04.016
- Barton, J. (2004). How good are we at predicting the field host-range of fungal pathogens used for classical biological control of weeds?. *Biological Control*, 31(1), 99-122.
- Bellows, TS y Headrick, DH (1999). Artrópodos y vertebrados en el control biológico de las plantas. En *Handbook of Biological Control* (pp. 505-516). Prensa Académica
- Bowling, A.J., Vaughn, K.C., Hoagland, R.E., Stetina, K., Boyette, C.D., 2010. Immunohistochemical investigation of the necrotrophic phase of the fungus *Colletotrichum gloeosporioides* in the biocontrol of hemp sesbania (*sesbania exaltata*;papilionaceae). *Am. J. Bot.* 97 (12), 1915–1925.
- Boyetchko, S.M., E.N. Roskopf, A.J. Caesar and R. Charudattan. 2002. Biological weed control with pathogens: search for candidates to applications. *Agriculture and Food Production*. 2:239–266.

- Boyette, C. D., & Hoagland, R. E. (2015). Bioherbical potential of *Xanthomonas campestris* for controlling *Conyza canadensis*. *Biocontrol Science and Technology*, 25(2), 229-237.
- Boyette, C.D., Hoagland, R.E., Stetina, K.C., 2015. Biological control of spreading dayflower (*Commelina diffusa*) with the fungal pathogen *Phoma commelinicola*. *Agronomy* 5, 519–536.
- Boyette, C.D., Hoagland, R.E., Weaver, M.A., 2008. Interaction of a bioherbicide and glyphosate for controlling hemp sesbania in glyphosate-resistant soybean. *Weed Biol. Manage.* 8, 18–24.
- Cai, X., Gu, M., 2016. Bioherbicides in organic horticulture. *Horticulturae* 2, 3. <https://doi.org/10.3390/horticulturae2020003>.
- Charudattan, R. (2005). Ecological, practical, and political inputs into selection of weed targets: what makes a good biological control target?. *Biological Control*, 35(3), 183-196.
- Charudattan, R., 1991. The mycoherbicide approach with plant pathogens. In: TeBeest, D.O. (Ed.), *Microbial Control of Weeds*. Chapman & Hall, New York, pp. 24–57.
- Cimmino, A., Masi, M., Evidente, M., Superchi, S., & Evidente, A. (2015). Fungal phytotoxins with potential herbicidal activity: chemical and biological characterization. *Natural product reports*, 32(12), 1629-1653.
- Connick Jr, W. J., Boyette, C. D., & Mcalpine, J. R. (1991). Formulation of mycoherbicides using a pasta-like process. *Biological Control*, 1(4), 281-287.
- Cook, J. C., Charudattan, R., Zimmerman, T. W., Roskopf, E. N., Stall, W. M., & MacDonald, G. E. (2009). Effects of *Alternaria destruens*, glyphosate, and ammonium sulfate individually and integrated for control of dodder (*Cuscuta pentagona*). *Weed technology*, 23(4), 550-555.

- Cordeau, S., Triolet, M., Wayman, S., Steinberg, C., Guillemin, J.P., 2016. Bioherbicides: dead in the water? a review of the existing products for integrated weed management. *Crop. Prot.* 87, 44–49.
- Culliney, T.W. (2005) Benefits of Classical Biological Control for Managing Invasive Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 131-150.
- Daniel Jr, J. J., Zobot, G. L., Tres, M. V., Harakava, R., Kuhn, R. C., & Mazutti, M. A. (2018). *Fusarium fujikuroi*: A novel source of metabolites with herbicidal activity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 314-320.
- Dauch, A. L., Watson, A. K., & Jabaji-Hare, S. H. (2003). Detection of the biocontrol agent *Colletotrichum coccodes* (183088) from the target weed velvetleaf and from soil by strain-specific PCR markers. *Journal of microbiological methods*, 55(1), 51-64.
- Dayan, F.E., Owens, D.K., Duke, S.O., 2012. Rationale for a natural products approach to herbicide discovery. *Pest Manag. Sci.* 68 (4), 519–528.
- De Silva, D. D., Crous, P. W., Ades, P. K., Hyde, K. D., & Taylor, P. W. (2017). Life styles of *Colletotrichum* species and implications for plant biosecurity. *Fungal Biology Reviews*, 31(3), 155-168
- Evidente, A., Cimmino, A., Andolfi, A., Berestetskiy, A., & Motta, A. (2011). Phomachalasin A–D, 26-oxa [16] and [15] cytochalasins produced by *Phoma exigua* var. *exigua*, a potential mycoherbicide for *Cirsium arvense* biocontrol. *Tetrahedron*, 67(8), 1557-1563.
- Frantzen, J. (2000). Disease epidemics and plant competition: control of *Senecio vulgaris* with *Puccinia lagenophorae*. *Basic and Applied Ecology*, 1(2), 141-148.
- Frantzen, J., & Müller-Schärer, H. (2006). Modeling the impact of a biocontrol agent, *Puccinia lagenophorae*, on interactions between a crop, *Daucus carota*, and a weed, *Senecio vulgaris*. *Biological Control*, 37(3), 301-306.
- Gan, P., Ikeda, K., Irieda, H., Narusaka, M., O'Connell, R. J., Narusaka, Y., et al. (2013). Comparative genomic and transcriptomic analyses reveal the

- hemibiotrophic stage shift of *Colletotrichum* fungi. *New Phytol.* 197, 1236–1249. doi: 10.1111/nph.12085
- Ghorbani, R., Leifert, C., & Seel, W. (2005). Biological control of weeds with antagonistic plant pathogens. *Advances in Agronomy*, 86, 191-225.
- Goeden, R. D., & Andres, L. A. (1999). Biological control of weeds in terrestrial and aquatic environments. In *Handbook of Biological Control* (pp. 871-890). Academic Press. <https://doi.org/10.1080/07352680590961649>
- Grace, B. S., & Müller-Schärer, H. (2003). Biological control of *Senecio vulgaris* in carrots (*Daucus carota*) with the rust fungus *Puccinia lagenophorae*. *Basic and Applied Ecology*, 4(4), 375-384.
- Grossmann, K. (2010). Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. *Pest. Manag. Sci.* 66, 113–120. doi: 10.1002/ps.1860
- Halgren, A., Azevedo, M., Mills, D., Armstrong, D., Thimmaiah, M., McPhail, K., et al. (2011). Selective inhibition of *Erwinia amylovora* by the herbicidally active germination-arrest factor (GAF) produced by *Pseudomonas* bacteria. *J. Appl. Microbiol.* 111, 949–959. doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.05098.x
- Halgren, A., Maselko, M., Azevedo, M., Mills, D., Armstrong, D., and Banowitz, G. (2013). Genetics of germination-arrest factor (GAF) production by *Pseudomonas fluorescens* WH6: identification of a gene cluster essential for GAF biosynthesis. *Microbiology* 159, 36–45. doi: 10.1099/mic.0.062166-0
- Harding, D. P., & Raizada, M. N. (2015). Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: a review. *Frontiers in plant science*, 6, 659.
- Hubbard, M., Taylor, W. G., Bailey, K. L., & Hynes, R. K. (2016). The dominant modes of action of macrocidins, bioherbicide metabolites of *Phoma macrostoma*, differ between susceptible plant species. *Environmental and Experimental Botany*, 132, 80-91.
- Imaizumi, S., Honda, M., & Fujimori, T. (1999). Effect of Temperature on the Control of Annual Bluegrass (*Poa annua* L.) with *Xanthomonas campestris*

- pv. poae (JT-P482). *Biological Control*, 16(1), 13–17.
doi:10.1006/bcon.1999.0728
- Imaizumi, S., Nishino, T., Miyabe, K., Fujimori, T., & Yamada, M. (1997). Biological Control of Annual Bluegrass (*Poa annua*L.) with a Japanese Isolate of *Xanthomonas campestris*pv.poa(JT-P482). *Biological Control*, 8(1), 7–14.
doi:10.1006/bcon.1996.0475
- Inman, R.E., 1971. A preliminary evaluation of rumex rust as a biological control agent for curly dock. *Phytopathology* 61 (1), 102–107.
- Johnson, B. J. (1994). Biological control of annual bluegrass with *Xanthomonas campestris* pv. poannua in bermudagrass. *HortScience*, 29(6), 659-662.
- Johnson, D. R., & Wyse, D. L. (1991). Use of *Pseudomonas syringae* pv. tagetis for control of Canada thistle. In *Proc. N. Cent. Weed Sci. Soc* (Vol. 46, pp. 14-15).
- Johnson, D. R., Wyse, D. L., and Jones, K. J. (1996). Controlling weeds with phytopathogenic bacteria. *Weed Technol.* 10, 621–624.
- Juan, Y. A. N. G., CAO, H. Z., Wei, W. A. N. G., ZHANG, L. H., & DONG, J. G. (2014). Isolation, identification, and herbicidal activity of metabolites produced by *Pseudomonas aeruginosa* CB-4. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(8), 1719-1726.
- Julien, M.H., Griffiths, M.W., 1998. *Biological Control of Weeds. A World Catalogue of Agents and Their Target Weeds*, fourth ed. CAB International, Wallingford, UK.
- Júnior, F. W. R., Scariot, M. A., Forte, C. T., Pandolfi, L., Dil, J. M., Weirich, S., ... & Galon, L. (2019). New perspectives for weeds control using autochthonous fungi with selective bioherbicide potential. *Heliyon*, 5(5), e01676.
- Kazinczi, G., Horváth, J., & Lukács, D. (2000). Germination characteristics of *Chenopodium* seeds derived from healthy and virus infected plants.

Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, (Sonderh. 17), 63-67.

Klaic, R., Kuhn, R. C., Foletto, E. L., Dal Prá, V., Jacques, R. J., Guedes, J. V., ... & Jahn, S. L. (2015). An overview regarding bioherbicide and their production methods by fermentation. *Fungal Bio-Molecules: Sources, Applications and Recent Developments*. 1ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 1, 183-200.

Lamberth, C., 2016. Naturally occurring amino acid derivatives with herbicidal, fungicidal or insecticidal activity. *Amino Acids* 48 (4), 929–940.

Lawrance, S., Varghese, S., Varghese, E. M., & Asok, A. K. (2019). Quinoline derivatives producing *Pseudomonas aeruginosa* H6 as an efficient bioherbicide for weed management. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 18, 101096.

Li, Y. Q., Sun, Z. L., Zhuang, X. F., Xu, L., Chen, S. F., and Li, M. Z. (2003). Research progress on microbial herbicides. *Crop Protect.* 22, 247–252. doi: 10.1016/s0261-2194(02)00189-8

Makowski, R. M., & Mortensen, K. (1998). Latent infections and penetration of the bioherbicide agent *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *malvae* in non-target field crops under controlled environmental conditions. *Mycological Research*, 102(12), 1545-1552.

Mazzola, M., Stahlman, P. W., & Leach, J. E. (1995). Application method affects the distribution and efficacy of rhizobacteria suppressive of downy brome (*Bromus tectorum*). *Soil Biology and Biochemistry*, 27(10), 1271-1278.

McFadyen, REC (1998). Control biológico de malezas. Revisión anual de entomología , 43 (1), 369-393.

McPhail, K. L., Armstrong, D. J., Azevedo, M. D., Banowetz, G. M., and Mills, D. I. (2010). 4-Formylaminoxyvinylglycine, an herbicidal germination-arrest factor from *Pseudomonas* rhizosphere bacteria. *J. Nat. Prod.* 73, 1853–1857. doi: 10.1021/np1004856

- Meir, S., Larroche, C., Al-Ahmad, H., & Gressel, J. (2009). Fungal transformation of *Colletotrichum coccodes* with bacterial *oahA* to suppress defenses of *Abutilon theophrasti*. *Crop protection*, 28(9), 749-755.
- Mingzhi, L. I., Ling, X. U., Ziling, S. U. N., & Yongquan, L. I. (2007). Isolation and Characterization of a Phytotoxin from *Xanthomonas campestris* pv. *retroflexus*. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(5), 639-642.
- Mitchell, J. K., Yerkes, C. N., Racine, S. R., & Lewis, E. H. (2008). The interaction of two potential fungal bioherbicides and a sub-lethal rate of glyphosate for the control of shattercane. *Biological Control*, 46(3), 391-399.
- Morin, L., Derby, J. A. L., & Kokko, E. G. (1996). Infection process of *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *malvae* on Malvaceae weeds. *Mycological Research*, 100(2), 165-172.
- Morin, L., Gianotti, A. F., & Lauren, D. R. (2000). Trichothecene production and pathogenicity of *Fusarium tumidum*, a candidate bioherbicide for gorse and broom in New Zealand. *Mycological research*, 104(8), 993-999.
- Motlagh, M. R. S. (2012). Evaluation of *Alternaria alternata* causing leaf spot of barnyardgrass grown in rice fields. *African Journal of Microbiology Research*, 6(21), 4481-4488.
- Oehrens, E., 1977. Biological Control of Blackberry Through the Introduction of the Rust, *Phragmidium violaceum*. *FAO Plant Protect. Bullet, Chile*, p. 25. 26–28.
- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43.
- Okoli, C. A. N., Shilling, D. G., Smith, R. L., & Bewick, T. A. (1997). Genetic Diversity in Purple Nutsedge (*Cyperus rotundus*L.) and Yellow Nutsedge (*Cyperus esculentus*L.). *Biological control*, 8(2), 111-118.
- Okrent, R. A., Halgren, A. B., Azevedo, M. D., Chang, J. H., Mills, D. I., Maselko, M., et al. (2014). Negative regulation of germination-arrest factor production

- in *Pseudomonas fluorescens* WH6 by a putative extracytoplasmic function sigma factor. *Microbiology* 160, 2432–2442. doi: 10.1099/mic.0.080317-0
- Omer, Z.S., Jacobsson, K., Eberhard, T.H., Johansson, L.K.H., 2010. Bacteria considered as biocontrol agents to control growth of white clover on golf courses. *Acta Agric. Scand. Sec. B Soil Plant Sci.* 60, 193–198.
- Pacanoski, Z. (2006). Herbicide-resistant crops-advantages and risks. *Herbologia*, 7(1), 47-59.
- Pacanoski, Z., 2015. Bioherbicides. In: Price, A., Kelton, J., Sarunaite, L. (Eds.), *Herbicides, Physiology of Action and Safety*. InTechOpen, Rijeka, Croatia, pp. 253–274.
- Pitelli, R. L. C. M., & Amorim, L. (2003). Effects of different dew periods and temperatures on infection of *Senna obtusifolia* by a Brazilian isolate of *Alternaria cassiae*. *Biological Control*, 28(2), 237-242.
- Radhakrishnan, R., Alqarawi, A. A., & Abd_Allah, E. F. (2018). Bioherbicides: Current knowledge on weed control mechanism. *Ecotoxicology and environmental safety*, 158, 131-138.
- Rana, S.S., Rana, M.C., 2016. *Principles and Practices of Weed Management*. Department of Agronomy. College of Agriculture, CSK Himachal Pradesh Krishi Vishvavidyalaya, Palampur, p. 138.
- Rivero-Cruz, J. F., García-Aguirre, G., Cerda-García-Rojas, C. M., & Mata, R. (2000). Conformational behavior and absolute stereostructure of two phytotoxic nonenolides from the fungus *Phoma herbarum*. *Tetrahedron*, 56(30), 5337-5344.
- Sandrin, T. R., TeBeest, D. O., & Weidemann, G. J. (2003). Soybean and sunflower oils increase the infectivity of *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene* to northern jointvetch. *Biological Control*, 26(3), 244-252.
- Saremi, H., Rostami, A. y Saremi, H. (2018). *Fusarium oxysporum*, un posible agente para el control biológico de *Papaver somniferum* en el Medio Oriente. *Protección de cultivos* , 114 , 187-194.

- Schisler, D. A., Howard, K. M., & Bothast, R. J. (1991). Enhancement of disease caused by *Colletotrichum truncatum* in *Sesbania exaltata* by coinoculating with epiphytic bacteria. *Biological Control*, 1(4), 261-268.
- Schwarzländer, M., Hinz, HL, Winston, RL. (2018). Biological weed control: an analysis of introductions, establishment rates and success rates, worldwide. 63: 319. <https://doi.org/10.1007/s10526-018-9890-8>
- Shabana, Y. M., Müller-Stöver, D., & Sauerborn, J. (2003). Granular Pesta formulation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *orthoceras* for biological control of sunflower broomrape: efficacy and shelf-life. *Biological Control*, 26(2), 189-201.
- Silman, R. W., Bothast, R. J., & Schisler, D. A. (1993). Production of *Colletotrichum truncatum* for use as a mycoherbicide: effects of culture, drying and storage on recovery and efficacy. *Biotechnology advances*, 11(3), 561-575.
- Souza, A. R. C. D., Baldoni, D. B., Lima, J., Porto, V., Marcuz, C., Machado, C., ... & Mazutti, M. A. (2017). Selection, isolation, and identification of fungi for bioherbicide production. *brazilian journal of microbiology*, 48(1), 101-108.
- Souza, Angélica Rossana Castro de, Baldoni, Daiana Bortoluzzi, Lima, Jessica, Porto, Vitória, Marcuz, Camila, Machado, Carolina, Ferraz, Rafael Camargo, Kuhn, Raquel C., Jacques, Rodrigo J.S., Guedes, Jerson V.C., & Mazutti, Marcio A.. (2017). Selection, isolation, and identification of fungi for bioherbicide production. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(1), 101-108. <https://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2016.09.004>
- Stergiopoulos, I., Collemare, J., Mehrabi, R., & De Wit, P. J. (2013). Phytotoxic secondary metabolites and peptides produced by plant pathogenic Dothideomycete fungi. *FEMS microbiology reviews*, 37(1), 67-93.
- Tang, W., Kuang, J., Qiang, S., 2013. Biological control of the invasive alien weed *Solidago canadensis*: combining an indigenous fungal isolate of *Sclerotium rolfsii* SC64 with mechanical control. *Biocontrol Sci. Technol.* 23, 1123–1136.

- Tang, W., Zhu, Y.Z., He, H.Q., Qiang, S., Auld, B.A., 2011. Effect of environmental factors and precursors on oxalic acid production, mycelial biomass and virulence of a potential bioherbicide isolate of *Sclerotium rolfsii* SC64 produced in liquid culture. *Biocontrol Sci. Technol.* 21, 917–927.
- Tateno, A. (2000). *Herbicidal Composition for the Control of Annual Bluegrass*. U.S. Patent No 6162763 A. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- THOMAS, H., HELLER, A., SAUERBORN, J., & MÜLLER-STÖVER, D. O. R. E. T. T. E. (1999). *Fusarium oxysporum* sp. *orthoceras*, a Potential Mycoherbicide, Parasitizes Seeds of *Orobanche cumana* (Sunflower Broomrape): a Cytological Study. *Annals of Botany*, 83(4), 453-458.
- Thomson, S. V., & Kropp, B. R. (2004). Production of *Puccinia thlaspeos* woad' strain inoculum using traditional farming equipment. *Phytopathology*, 94(6).
- Todero, I., Confortin, T. C., Luft, L., Brun, T., Ugalde, G. A., de Almeida, T. C., ... & Mazutti, M. A. (2018). Formulation of a bioherbicide with metabolites from *Phoma* sp. *Scientia horticultrae*, 241, 285-292.
- Trognitz, F., Hackl, E., Widhalm, S. y Sessitsch, A. (2016). El papel de las interacciones planta-microbioma en el establecimiento y control de malezas. *FEMS microbiology ecology* , 92 (10).
- Uludag, A., Uremis, I., & Arslan, M. (2018). *Biological Weed Control*. In *Non-Chemical Weed Control* (pp. 115-132). Academic Press.
- Wilgen, B.W., Moran, V.C. & Hoffmann, J.H. (2013). Some Perspectives on the Risks and Benefits of Biological Control of Invasive Alien Plants in the Management of Natural Ecosystems. *Environmental Management* 52: 531. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0099-4>
- Winston RL, Schwarzländer M, Hinz HL, Day MD, Cock MJW, Julien MH (2014) *Biological control of weeds: a world catalogue of agents and their target weeds*, 5th edn. FHTET-2014-04. USDA Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, Morgantown.

- WSSA. (2019). WSSA Position Statement on Biological Control of Weeds, <http://wssa.Net/wssa/weed/biologicalcontrol/> (accessed 27.10.19).
- Zahran, E., Sauerborn, J., Abbasher, A. A., Ahmed, E. A., Mohukker, R. I., Karlovsky, P., & Müller-Stöver, D. (2008). "Pesta" and alginate delivery systems of *Fusarium* spp. for biological control of *Striga hermonthica* (Del.) Benth. under Sudanese field conditions. *Biological Control*, 44(2), 160-168.
- Zhang, W., Wolf, T. M., Bailey, K. L., Mortensen, K., & Boyetchko, S. M. (2003). Screening of adjuvants for bioherbicide formulations with *Colletotrichum* spp. and *Phoma* spp. *Biological Control*, 26(2), 95-108.
- Zhang, Y., Yang, X., Zhu, Y., Li, L., Zhang, Y., Li, J., & Qiang, S. (2019). Biological control of *Solidago canadensis* using a bioherbicide isolate of *Sclerotium rolfsii* SC64 increased the biodiversity in invaded habitats. *Biological Control*, 139, 104093.