

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Bioinsumos na cultura da soja

*Maurício Conrado Meyer
Adeney de Freitas Bueno
Sérgio Miguel Mazaro
Juliano Cesar da Silva*

Editores Técnicos

*Embrapa
Brasília, DF
2022*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja

Rodovia Carlos João Strass, acesso Orlando Amaral, Distrito de Warta
Caixa Postal 231, CEP 86001-970, Londrina, PR
Fone: (43) 3371 6000 Fax: (43) 3371 6100
www.embrapa.br/
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Unidade responsável pelo conteúdo e edição

Embrapa Soja

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Alvadi Antonio Balbinot Junior*

Secretária-Executiva: *Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*

Membros: *Claudine Dinali Santos Seixas, Edson Hirose, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, José de Barros França Neto, Liliane Márcia Mertz-Henning, Marco Antonio Nogueira, Mônica Juliani Zavaglia Pereira e Norman Neumaier*

Supervisão editorial: *Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*

Normalização bibliográfica: *Valéria de Fátima Cardoso*

Projeto gráfico e editoração eletrônica: *Edil Gomes*

Capa: *Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*

1ª edição: 2022

1ª impressão: PDF digitalizado

O conteúdo do livro, bem como a exatidão das citações e referências, são de inteira responsabilidade dos autores.

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Bioinsumos na cultura da soja / Maurício Conrado Meyer... [et al.] editores técnicos – Brasília,
DF: Embrapa, 2022.
550 p.

ISBN: ISBN: 978-65-87380-96-4

1. Soja. 2. Produção vegetal. 3. Insumo. 4. Fertilizante. I. Meyer, Maurício Conrado. II. Bueno, Adeny de Freitas. III. Mazarro, Sérgio Miguel. IV. Silva, Juliano Cesar da.

CDD: 633.34: 631.8 (21. ed.)

Valéria de Fátima Cardoso (CRB 9/1188)

©Embrapa, 2022

Manejo de doenças fúngicas radiculares da soja

Flávio Henrique Vasconcelos de Medeiros

Guilherme Passerini Bavia

Claudine Dinali Santos Seixas

Introdução

Um dos grandes entraves presentes nos cultivos agrícolas anuais são as doenças causadas principalmente por patógenos habitantes de solo, como os nematoides e os fungos causadores de podridões radiculares.

As perdas em produtividade resultantes da infecção por doenças fúngicas radiculares podem variar muito de ano para ano e em um mesmo campo, em áreas onde a pressão de inóculo é maior que em outras. Em um levantamento de perdas causadas por doenças em soja no mundo que inclui o Brasil, antes da detecção da ferrugem-asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), Wrather et al. (1997) estimaram que as doenças radiculares respondiam por uma perda global de cerca de dois milhões de toneladas de grãos. Estimativas apontam que só para podridão de raízes causada pelas espécies de *Fusarium*, no ano de 2014, as perdas foram de 7,5 milhões de toneladas (Allen et al., 2017). Vale salientar que o cenário mudou muito desde esses levantamentos e essas perdas podem ser maiores que as apontadas.

Desde essa época não apenas as áreas de cultivo de soja aumentaram como a adoção da mecanização foi fundamental para proporcionar os aumentos de produtividade e redução de custos de produção. Por outro lado, a intensificação de circulação de máquinas contribuiu também para o aumento da compactação e disseminação do inóculo desses patógenos. Esse cenário, aliado ao fato da estreita gama de opções para sucessão e rotação do cultivo de soja, como com o milho, patógenos que infectam esses hospedeiros passaram a aumentar em importância nos últimos anos, como a podridão-de-carvão (*Macrophomina phaseolina*) e o tombamento (*Pythium ultimum*), patógenos que podem infectar tanto soja quanto milho.

No Brasil grandes perdas por doenças radiculares são também observadas para o fungo habitante do solo causador do mofo-branco da soja (*Sclerotinia sclerotiorum*) e os nematoides que serão abordados em capítulos específicos deste livro.

Os fungos causadores de podridões radiculares da soja

Quando se fala em fungos habitantes do solo, há aqueles nativos do solo, que estavam presentes mesmo antes da introdução da planta cultivada, aqueles introduzidos pelo maquinário e aqueles introduzidos por sementes. Independente da origem do fitopatógeno, sua prevalência e os danos ao cultivo vão estar diretamente relacionados a sua população e às condições favoráveis.

Em sua grande maioria esses patógenos causam doenças monocíclicas, ou seja, seu inóculo aumenta ao longo dos ciclos de cultivos sucessivos com plantas suscetíveis e as reduções em produtividade são graduais e, assim, passam muitas vezes despercebidas nos primeiros anos de infestação.

Portanto, o primeiro passo para o manejo de doenças fúngicas radiculares é a determinação de que fungo fitopatogênico está presente e quais os prejuízos que estão sendo causados. As doenças radiculares ocorrem em um padrão de distribuição em reboleira e, portanto, um mapa de colheita ou análise de imagens de satélite NDVI podem direcionar a amostragem para determinação da etiologia das perdas e dos danos obtidos na lavoura. Tanto as estratégias de amostragem quanto de quantificação do dano são áreas que estão sendo pesquisadas, mas ainda há muito o que se determinar para que um padrão próximo ao que se pratica com agricultura de precisão para fertilidade do solo possa ser extrapolado para o manejo de doenças radiculares. Infelizmente ainda não se tem validado um método que possa identificar com precisão todos os fungos ao mesmo tempo e a estratégia mais adequada é determinar os locais da propriedade onde está se observando redução em produtividade, identificar a causa e, caso se suspeite de etiologia fúngica, enviar para o laboratório de fitopatologia para determinar a espécie do agente etiológico. Note que para muitos desses fitopatógenos, a confirmação da identificação só pode ser dada por técnicas de biologia molecular como o PCR com *primers* específicos, como acontece para as espécies do complexo *Fusarium solani* (Cai et al., 2011) ou ainda para espécies do gênero *Macrophomina* (Santos et al., 2020).

Como o propósito do livro é dar um enfoque no manejo das doenças fúngicas radiculares com os bioinsumos, não abordaremos em detalhes todas as características de todas as doenças que os patógenos radiculares podem causar, mas em linhas gerais como os bioinsumos podem contribuir para o seu manejo considerando as características intrínsecas do parasitismo e ciclo de vida de cada espécie fúngica.

Uma primeira característica importante de se considerar quando abordamos o tema bioinsumos para manejo de doenças radiculares são as estruturas de resistência. Todos os patógenos radiculares formam algum tipo de estrutura de resistência que pode garantir sua sobrevivência na ausência de um substrato em que possa crescer. Essas estruturas podem ficar dormentes no solo até que se tenha uma fonte de nutriente que estimule sua germinação, os chamados patoestimulantes (Nelson, 2004). Vale salientar que essas substâncias já são secretadas desde a embebição de sementes, na primeira fase da germinação, antes mesmo da protrusão radicular e, com isso, patógenos como *Pythium ultimum* podem infectar a semente, antes mesmo da planta emergir (Zitnick-Anderson et al., 2015). Na Tabela 1 apresentamos os principais fungos fitopatogênicos habitantes do solo que infectam a soja, suas estruturas de resistência, gama de hospedeiras, sintomas e condições favoráveis para infecção. O conhecimento dessas particularidades é de suma importância para a determinação do bioinsumo mais adequado para o manejo, a forma e o momento ideal para sua aplicação, conforme mencionaremos ao longo deste capítulo.

Considerando que muitos dos patógenos radiculares infectam as plantas desde o momento da embebição (Nelson, 2004), o tratamento de sementes com fungicida químico tem sido postulado como a estratégia mais eficiente para o manejo dessas doenças e, de fato, tem ajudado muito não apenas na proteção da semente e plântula como também na erradicação de patógenos transmitidos pelas sementes. No entanto, ainda se conhece pouco da distribuição das espécies, suas populações e pressão de inóculo presentes nas áreas de produção e, portanto, um tratamento de sementes nem sempre resulta em eficiência para o alvo que se busca, como por exemplo para o manejo de *Pythium* (Broders et al., 2007).

Há diversos estudos para identificar fontes de resistência para *Pythium* sp. em soja (Lin et al., 2020) e essa pode representar uma estratégia de manejo importante no futuro, particularmente com as novas técnicas de engenharia de plantas. No momento, o manejo dessa doença se baseia no tratamento de sementes com fungicida. Tendo em vista que o patógeno infecta predominantemente a semente ou a plântula, o tratamento com fungicidas seria o suficiente para controlar a doença, mas essa não tem sido a realidade em todas as situações. A concentração inibitória (EC50) varia em até 10 vezes para diferentes populações de uma mesma espécie, em até duas vezes para uma mesma população de uma espécie quando a temperatura do solo é mais elevada (13 °C para 23 °C) e em até dez vezes de acordo com o produto, quando se compara azoxistrobina com metalaxil (Matthiesen; Robertson, 2021). Portanto, os bioinsumos representam uma estratégia importante para o manejo dessa doença.

O registro de bioinsumos no Brasil e seu uso para proteção de cultivos

O registro de produtos usados na agricultura é crucial para garantir sua aplicação prática, segura e legítima. O escopo do Programa Nacional de Bioinsumos aborda na produção vegetal:

- 1) Controle de pragas e doenças, que engloba biofungicidas, bioinseticidas, bioacaricidas e outros ativos biológicos;
- 2) Nutrição e fisiologia de plantas, com inoculantes, biofertilizantes, bioestimulantes e outros ativos biológicos;
- 3) Manejo de espécies vegetais, pelo desenvolvimento de práticas e tecnologias biológicas aplicadas ao manejo da cultura.

Importante destacar neste tópico, que irá abordar o papel dos insumos biológicos no manejo de doenças fúngicas radiculares da soja, que os organismos vivos que controlam a população de pragas e doenças, são classificados como os agentes de biocontrole. Em sua maioria, são ativos com baixa toxicidade e com a finalidade de manejar a praga alvo sem causar danos ao ambiente.

Os inoculantes, bioestimulantes e biofertilizantes, além das práticas de manejo de espécies vegetais, também estão ligados com a saúde do solo e das plantas. Logo, mesmo sem a finalidade de combater singularmente a praga alvo, essas tecnologias são estratégias para condicionar o ambiente de produção e estimular o metabolismo vegetal e, com isso, o tornar mais tolerante frente às adversidades do meio.

Há muito se pesquisa e publica sobre bioinsumos para proteção de plantas contra doenças radiculares, mas ainda são poucas dessas descobertas que se tornaram produtos comerciais. Como o livro se destina a todos os níveis de produção e tecnologia disponíveis, do pequeno ao grande produtor, apresentamos a seguir um panorama mais geral de diversas opções de bioinsumos que podem ser utilizados para o

Tabela 1. Características dos principais fungos causadores de podridões radiculares em soja no Brasil.

Fitopatógeno	Espécies	Sintomatologia	Estrutura de resistência	Gama de hospedeiras	Referências
<i>Pythium</i> spp.	<i>P. ultimum</i> var. <i>ultimum</i> <i>P. ultimum</i> var. <i>sporangiiferum</i> <i>P. kashmirense</i> <i>P. heterothallic</i> <i>P. irregulare</i> <i>P. attrantheridium</i> <i>P. dissotocum</i> <i>P. echinulatum</i> <i>P. graminicola</i> <i>P. helicoides</i> <i>P. inflatum</i> <i>P. silvaticum</i> <i>P. toluosum</i>	Tombamento de pré e pós emergência; apodrecimento da semente ou podridão aquosa na base do caule	oósporo	diversas plantas cultivadas tanto dicotiledôneas quanto monocotiledôneas	Hartman et al. (1999); Zitnick-Anderson; Nelson (2015); Broders et al. (2007)
<i>Macrophomina</i>	<i>M. phaseolina</i> <i>M. pseudophaseolina</i> <i>M. euphorbicola</i>	Podridão de carvão: mancha cinzenta na base do caule visível no momento do enchimento de grãos, associado ao sintoma reflexo de epinastia e murcha de folhas culminando com morte precoce de plantas	escleródio	diversas plantas cultivadas tanto dicotiledôneas quanto monocotiledôneas	Negreiros et al. (2019); Santos et al. (2020)
<i>Fusarium solani</i> species complex	<i>F. brasiliense</i> <i>F. tucumaniae</i> <i>F. cuneirostrum</i> <i>F. paranaensis</i>	Tombamento de plantas pela podridão na região do caule que apresenta mancha vermelha (podridão vermelha) e sintoma reflexo de folha do terço inferior com sintoma de clorose e necrose interinterval (carijó). Algumas espécies podem causar o sintoma de morte súbita, com murcha e morte de plantas antes do enchimento de grãos. As infecções acontecem no início do desenvolvimento de plantas, mas os sintomas reflexos só aparecem a partir do florescimento	clamidósporo	leguminosas, principalmente soja e feijão	Roy et al. (1997) Scandiani et al. (2012); Aoki et al. (2005)
<i>Fusarium oxysporum</i> species complex	Grupos de compatibilidade vegetativa (VCG) e sexual (mating populations) que diferem em virulência	Podridão de raízes e bloqueio do fluxo de seiva bruta em função da colonização que resulta em murcha de plantas mais usualmente observada a partir do florescimento. O patógeno pode ser transmitido por semente e as infecções acontecem desde os primeiros estádios de desenvolvimento da plântula	clamidósporo	soja	Ellis et al. (2014); Lanubile et al. (2016)
<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>R. solani</i> - diversos grupos de anastomose	Lesão deprimida marrom na região do colo que pode se tornar uma incisão anelar e levar ao tombamento	escleródio	várias dicotiledôneas, grupo de anastomose (AG) está relacionado a gama de hospedeiras	Ajayi-Oyetunde; Bradley (2018)
<i>Athelia</i>	<i>Athelia rolfsii</i> (syn. <i>Sclerotium rolfsii</i>)	Murcha de plantas e associação de micélio branco e escleródios esféricos marrons na base do caule. Os sintomas são observados principalmente após o florescimento, mas as infecções podem acontecer a qualquer momento durante o ciclo de desenvolvimento do patógeno	escleródio	dicotiledôneas de forma geral	Iqbal et al. (2017)

manejo de doenças radiculares de etiologia fúngica. Note que nem todas as soluções apresentadas foram validadas para a soja e, mesmo com o registro de produtos biológicos por alvo, há de ser feito o teste antes de incorporar um determinado bioinsumo no manejo de doenças radiculares da soja.

Os bioinsumos para a proteção de plantas no manejo de doenças radiculares

Em ambientes tropicais, os danos econômicos com doenças radiculares são mais acentuados do que em ambientes temperados. Visto que as condições ambientais favorecem o cultivo continuado de plantas hospedeiras no sistema de produção, além das menores flutuações climáticas, o que causa pouco impacto na população exponencial dos causadores de doenças. Não podemos nos esquecer dos solos com baixo teor de matéria orgânica e baixa diversidade biológica, que facilitam o desenvolvimento de patógenos radiculares e as doenças por eles causadas (Michereff et al., 2005).

Entre os patógenos radiculares estão os fungos, que representam a maior classe, os oomicetos, as bactérias e os nematoides. Neste capítulo, em específico, serão abordados os fungos e oomicetos que causam doenças no sistema radicular da cultura da soja. Vale ressaltar, ainda, que todos são espécies que passam a maior parte do seu ciclo de vida no solo, infectam raízes e possuem capacidade de sobrevivência saprofítica, mesmo na ausência da planta hospedeira, obtendo seus nutrientes a partir de tecidos mortos e/ou em decomposição (Hillocks; Waller, 1997).

Com elevado grau de dificuldade de controle, devido à alta especificidade desses patógenos com o seu hospedeiro, as doenças do sistema radicular resultam de um solo desequilibrado, geralmente, com elevada simplicidade ecológica, baixa diversidade biológica e baixo potencial de resiliência (Jenkins; Jain, 2010).

Dentre as formas de manejo, o controle biológico de doenças radiculares tem ganhado espaço, a classe de produtos comerciais que tem demonstrado potencial para seu manejo são os biofungicidas e com isto o crescimento desse mercado só aumenta todos os anos em número de empresas e produtos disponíveis. Estes produtos eram constituídos exclusivamente de um único microrganismo, mas hoje se tem vários produtos compostos de misturas de organismos, uma maior caracterização dos metabólitos por eles produzidos, mecanismos de ação e compatibilidades com outros defensivos. Estes produtos são introduzidos nos sistemas de produção por meio de inoculação e/ou inundação.

Nesse cenário, a colonização inadequada da espermosfera e rizosfera podem prejudicar sucesso dessa tecnologia. As ciências-ômicas, que permitem analisar genes, proteínas e metabólitos, estão contribuindo com o avanço acelerado das ferramentas biológicas no campo, desde a seleção ao controle de qualidade (Bettiol et al., 2021). Já que permitem uma triagem mais rápida de populações microbianas, com o objetivo de identificar cepas com múltiplos atributos funcionais para a supressão de patógenos.

Estratégias para fortalecer e aproveitar o potencial do microbioma nativo de solos agrícolas têm sido amplamente adotadas pelos microbiologistas e fitopatologistas. A construção e o gerenciamento de solos supressivos inviabilizam o estabelecimento ou a persistência do patógeno no sistema e, mesmo que ele persista no solo, a doença torna-se progressivamente menos severa e os bioinsumos podem contribuir para a construção e manutenção dessa supressividade, conforme apontado por Hoitink e Boehm (1999).

Existem diversas estratégias de manejo de doenças para a cultura da soja, geridas por diferentes tipos de patógenos, morfologia, tipo de genoma e várias outras características etiológicas. As estratégias

de manejo de doenças incluem sistemas naturais de defesa de plantas, fungicidas, manejos culturais e resistência genética. Algumas dessas medidas são altamente eficazes para inibir patógenos, porém também constituem riscos à saúde e ao ambiente. Nesse cenário, há necessidade de técnicas alternativas de controle de doenças que integrem as questões de segurança alimentar, qualidade ambiental e resistência a pesticidas.

Estratégias com o uso de diferentes tipos de bioinsumos, como agentes de biocontrole, bactérias promotoras de crescimento e biofertilizantes têm sido utilizados como alternativas aos fungicidas. Este capítulo explora o papel dos bioinsumos no manejo de doenças da soja, além da sua contribuição para o aumento da produtividade e qualidade da cultura.

Agentes de biocontrole

Os agentes de biocontrole são microrganismos antagonistas com potencial de interferir na sobrevivência ou crescimento dos patógenos. Os principais microrganismos para o controle biológico de doenças são os fungos e as bactérias. Os mecanismos de interações antagônicas são divididos em antibiose, indução de resistência, parasitismo, predação, competição e promoção de crescimento.

Os fungos classificados nessa dimensão, tem como seu principal representante o grupo dos ascomicetos, que podem controlar outros fungos, bactérias e nematoides. Dentre os mais estudados, está o gênero *Trichoderma*, que são fungos habitantes de solo que apresentam diversos mecanismos de controle, principalmente contra patógenos radiculares, além do efeito de promoção de crescimento. Diversas espécies são estudadas para o controle de fungos radiculares, como *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma virens*, *Trichoderma viride*, entre outros.

Os principais alvos são os fungos causadores de podridão de raízes, de tombamento de plantas (*damping-off*) e podridão de haste. Logo, os gêneros de *Macrophomina*, *Fusarium* e *Rhizoctonia* são controlados por espécies de *Trichoderma*.

No entanto, um dos principais exemplos de sucesso na soja, é o controle biológico do mofo-branco, causado por *Sclerotinia sclerotiorum*, patógeno de difícil controle devido sua capacidade de formar escleródios e por possuir uma ampla gama de hospedeiros. Assim, um dos principais mecanismos de ação do *Trichoderma* é o parasitismo do escleródio, que inviabiliza ou reduz a germinação carpogênica e miceliogênica e afeta drasticamente o potencial do inóculo. Adicionalmente, o efeito do *Trichoderma* no controle de *Rhizoctonia solani* é conhecido há muito tempo, sua capacidade de parasitar e destruir o conteúdo citoplasmático do patógeno é documentado desde 1932 (Weindling, 1932).

Metabólitos secundários, como terpenos, e as enzimas degradadoras de parede celular produzidos por cepas de *Trichoderma*, têm demonstrado alta eficácia na inibição da germinação dos esporos, crescimento de hifas e desenvolvimento das estruturas de resistência como escleródios e clamidósporos de diversos patógenos, entre eles *Macrophomina*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Phoma* etc (Monte et al., 2019).

Além disso, o *Trichoderma* é um excelente competidor por recursos nutricionais nos solos, o que reduz a quantidade de nutrientes, oxigênio e espaço físico para agentes fitopatogênicos. Através da sua alta interação com as plantas pode auxiliar no aumento da atividade das enzimas antioxidantes e reduzir os níveis de espécies reativas de oxigênio, que são prejudiciais as plantas (Mastouri et al., 2012). Além disso, já é bem documentado a indução de resistência sistêmica nas plantas ativada por espécies de *Trichoderma*.

Já para as bactérias, os principais gêneros que atuam como antagonistas são *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Pasteuria* e *Rhizobium*. Para o controle de doenças radiculares o *Bacillus* representa o gênero mais estudado e aplicado. Com diversos mecanismos de ação e facilidade de produção, se tornou o principal ativo biológico dos produtos registrados para uso comercial no Brasil. Senthilkumar et al, (2009) utilizando uma cepa de *Bacillus* spp. para controle de patógenos causadores de podridão radicular da cultura da soja, demonstrou que a estirpe foi capaz de inibir o crescimento de *Rhizoctonia bataticola*, *Macrophomina phaseolina*, *Fusarium udum* e *Sclerotium rolfsii*, além de promover o crescimento das plantas e elevar a taxa de germinação. Diversos resultados positivos são relatados na literatura com *Bacillus* spp. e *Pseudomonas* spp. no controle de vários patógenos causadores de damping-off e podridões de raízes, (Berg, 2009; Choudhary; Johri, 2009), entre eles *Fusarium oxysporum* (Xu et al., 2020) e *Rhizoctonia solani* (Peng et al., 2014).

O uso consorciado de agentes de controle biológico de doenças deve ser pensado para aumentar a versatilidade, a capacidade de sobrevivência e os mecanismos de ação para controle de patógenos radiculares. Entre os desafios para o consórcio de microrganismos está a compatibilidade biológica, campo com enorme potencial prático que deve avançar amplamente nos próximos anos.

Por fim, a introdução dos bioinsumos a base de agentes de biocontrole podem auxiliar na formação de solos supressivos, solos que inviabilizam o estabelecimento de fitopatógenos que podem causar danos a nível econômico. Diversos mecanismos de ação dos microrganismos estão envolvidos na supressão de patógenos nos solos supressivos, entre eles: parasitismo, competição por sítio de infecção e por nutrientes, produção de metabólitos secundários e indução de resistência sistêmica.

Biofertilizantes

Entre os biofertilizantes, conforme a legislação brasileira, estão classificados os aminoácidos, os extratos de algas e vegetais e as substâncias húmicas. Neste tópico, vamos abordar como essas substâncias podem auxiliar na proteção de plantas contra patógenos, principalmente através das modulações benéficas e estímulos que podem provocar na comunidade de microrganismos.

Os efeitos bioestimulantes mais importantes das substâncias húmicas incluem a melhoria do sistema radicular, com o aumento da troca catiônica e a capacidade de retenção de água, além da disponibilização de fósforo e proteção contra variados estresses ambientais. Os efeitos benéficos ocorrem devido às interações resultantes entre a matéria orgânica do solo, os microrganismos e as raízes das plantas (Canellas; Olivares, 2014; Du Jardin, 2015; Conselvan et al., 2017; Shahabivand et al., 2018).

As substâncias húmicas afetam o metabolismo vegetal primário, o complexo enzimático relacionado aos processos celulares, o metabolismo secundário, a agregação e a estrutura do solo, a capacidade de troca catiônica e de retenção de água, a biodisponibilidade de nutrientes imóveis, como o fósforo, e a diminuição da toxicidade por alumínio e metais pesados.

O efeito das substâncias húmicas pode estimular o crescimento de plantas e ativar rotas bioquímicas que podem resultar na proteção da cultura, amenizando vários estresses, incluindo a proliferação de doenças. Diversos trabalhos comprovam que as substâncias húmicas aumentam a

atividade das principais enzimas antioxidantes, responsáveis por neutralizar as respostas ao estresse vegetal (Quaggiotti et al., 2004; Schiavon et al., 2010).

Além disso, foi relatado que a aplicação de substâncias húmicas interfere na comunidade microbiana do solo (Derkowska et al., 2015). Essa interação entre planta e comunidade microbiana pode melhorar os processos fisiológicos envolvidos na defesa contra patógenos e mineralização e solubilização de nutrientes (Canellas; Olivares, 2014).

Existem vários mecanismos ou modos de ação envolvidos na supressão de patógenos que incluem antibiose, competição por substrato, competição por locais de infecção na raiz e resistência sistêmica induzida (Dordas, 2008). Embora as substâncias húmicas sejam distintas, seus efeitos podem contribuir para o aumento da resiliência do ambiente de produção, seja pela alteração da comunidade microbiana ou por estímulos para o crescimento e desenvolvimento saudável das plantas.

O uso de extratos de plantas, por seus efeitos bioestimulantes na agricultura, tem ganhado atenção no cenário atual, com isso uma lista crescente de espécies com essas propriedades tem sido documentada (Kruse et al., 2000). Extratos usados com frequência incluem algas (algas marinhas), *Moringa oleifera*, água de sorgo e água de amora (Du Jardim, 2015; Machado et al., 2019; O’Keeffe et al., 2019; Khan et al., 2020). As espécies botânicas e de algas contêm importantes compostos bioativos estimuladores do crescimento das plantas, responsáveis pela sua eficácia como bioestimulantes. Esses compostos incluem carboidratos, minerais, hormônios de crescimento, como citocininas e auxinas, betaínas, taninos, flavonoides, alcaloides e saponinas (Persaud et al., 2019).

Os extratos de plantas podem suprimir os microrganismos, através dos seus compostos bioativos sintetizados no metabolismo secundário das plantas, inibindo o crescimento e desenvolvimento dos patógenos responsáveis pelo desenvolvimento da doença. (Akula; Ravishankar, 2011).

Os extratos de algas marinhas possuem dois modos de ação, são bioestimulantes, como discutido acima, que aumentam o crescimento e a produtividade das culturas, mas também contribuem diretamente para a saúde do solo (Khan et al., 2009). No solo, podem permitir um aumento nos minerais disponíveis para as plantas e aumento da aeração do solo e capacidade de retenção de água (Illera-Vives et al., 2015). Logo, sua presença na rizosfera pode favorecer a atividade de microrganismos antagonísticos, os quais podem favorecer o controle de patógenos (Alam et al., 2013, 2014), visto que aplicação de extratos selecionados de algas marinhas diretamente no solo alterou a população microbiana da rizosfera. Além disso, é relatado que a aplicação das algas Induz a nodulação de rizóbio por meio da regulação do processo de sinalização (Khan et al., 2013), característica que também pode contribuir para a proteção radicular da cultura.

Já os aminoácidos são moléculas orgânicas que podem desempenhar papéis diferentes nas plantas, como a regulação da captação de nitrogênio (Miller et al., 2007), o desenvolvimento da raiz (Walch-Liu; Forde, 2007; Weiland et al., 2015) e aumento da atividade do metabolismo antioxidante (Hildebrandt et al., 2015; Weiland et al., 2015). Além disso, suas aplicações no solo também podem aumentar a atividade biológica (Souri, 2015).

Com as novas cultivares de soja demonstrando maior potencial produtivo, é importante o uso de biofertilizantes que possam auxiliar a planta a expressar seu máximo potencial genético. É notório que a severidade de doenças pode ser reduzida pelo aumento da tolerância das plantas aos estresses abióticos

e resistência aos estresses bióticos, seja através do estímulo fisiológico ou mudanças estruturais na comunidade microbiana do solo que essas substâncias podem causar.

Bactérias promotoras de crescimento

As bactérias promotoras de crescimento podem proteger diversas culturas, como cereais e leguminosas, da infecção de diferentes doenças causadas por vírus, fungos, bactérias e nematoides, bem como aquelas causadas por deficiências de nutrientes. Embora as bactérias promotoras de crescimento possam usar vários modos de ação no controle de patógenos de plantas, todo o processo pode ser resumido em dois mecanismos básicos, ou seja, direto e indireto (Glick, 1995; Gupta et al., 2015).

Os mecanismos de efeito direto sobre os patógenos vegetais incluem a produção de antibióticos como piocianina (Pierson; Thomashow, 1992), produção de sideróforos (O'Sullivan; O'Gara, 1992), síntese de cianeto de hidrogênio (Glick, 1995), enzimas que podem hidrolisar as paredes celulares de patógenos de plantas (Mauch et al., 1988), competição por locais de colonização e por nutrientes (O'Sullivan; O'Gara, 1992 ; Prasad et al., 2015), bem como a degradação dos fatores de patogenicidade de substâncias como toxinas e enzimas (Podile; Kishore, 2006; Prasad et al., 2015). Por outro lado, o efeito indireto inclui indução de resistência e promoção de crescimento (Glick, 1995).

As bactérias promotoras de crescimento são conhecidas por produzir uma série de compostos que possuem atividade antimicrobiana, incluindo antibióticos de amplo espectro, enzimas líticas, diferentes tipos de exotoxinas e bacteriocinas (Riley; Wertz, 2002). A produção de sideróforos é outro mecanismo comum por meio do qual os microrganismos previnem os efeitos nocivos dos fitopatógenos (Glick et al., 2010). As bactérias produzem pequenas moléculas quelantes de ferro conhecidas como sideróforos, que se ligam aos íons férricos e os removem do ambiente do solo, tornando-os indisponíveis para o patógeno, um tipo de estratégia indireta de promoção do crescimento vegetal (Persello-Cartieaux et al., 2003). No solo, a capacidade das bactérias de produzir sideróforos desempenha um papel importante na melhoria do desenvolvimento da planta.

A produção de antibióticos é outro mecanismo comum pelo qual as bactérias promotoras de crescimento realizam o processo de antagonismo contra os fitopatógenos (Gómez-Exposito et al., 2017). Esses antibióticos são compostos orgânicos de baixo peso molecular que matam ou reduzem o impacto dos patógenos radiculares (Whipps, 2001; Duffy et al., 2003). Uma atenção notória tem sido dada aos microrganismos capazes de produzir o antibiótico 2,4-diacetil-floroglucinol (2,4-DAPG), o qual é capaz de inibir vários tipos de fungos. *Pseudomonas* spp. fluorescentes caracteriza o principal grupo produtor, com capacidade de suprimir doenças radiculares. Alguns trabalhos mostraram que isolados de *Pseudomonas* foram capazes de suprimir fungos causadores de damping-off como *Pythium ultimum* (Fenton et al., 1992) e causadores de podridão radicular, como *Fusarium* (Duffy; Défago, 1997)

As rizobactérias como o *Bradyrhizobium japonicum* que é amplamente utilizado na cultura da soja para fixação biológica do nitrogênio, também pode reduzir com sucesso os sintomas de doenças radiculares. Diferentes mecanismos podem estar envolvidos na supressão de patógenos fúngicos por cepas de *Bradyrhizobium*. Esses mecanismos incluem produção de antibióticos (Chakraborty; Purkayasta, 1983), produção de sideróforo (Nambiar 1987; Guerinot et al., 1990; Omar; AbdAlla 1998), produção

de cianeto de hidrogênio (Antoun 1998), nodulação, promoção do crescimento da planta (Chakraborty; Purkayasta 1983; Siddiqui et al., 2004; Al-Ani et al., 2012) e indução de resistência (Gao et al., 2012). Importante ressaltar que o potencial de biocontrole é intrínseco à cepa considerada, tendo em vista que nem todos os isolados desta espécie desempenham potencial de biocontrole de doenças radiculares (Russiano, 2020). Além de *Rhizobium*, alguns gêneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum* e *Agrobacterium* são conhecidos como rizobactérias que podem promover crescimento dos vegetais. Fica claro que as bactérias promotoras de crescimento podem ser potenciais antagonistas de fitopatógenos, além dos diversos mecanismos que possuem para auxiliar no desenvolvimento das plantas. É uma área de estudos com grande potencial, visto que ainda existem mecanismos por serem descobertos e potenciais de uso a serem construídos, particularmente quando se considera a sinergia entre os diferentes bioinsumos empregados.

Formas de aplicação disponíveis

A oportunidade para a utilização em larga escala dos bioinsumos está no uso combinado com práticas agrônômicas já estabelecidas nas lavouras, como no tratamento de sementes, no sulco de semeadura e/ou na aplicação em conjunto com fungicidas e/ou herbicidas desde que se atente para a compatibilidade, conforme mencionado no capítulo 27.

A semeadura oferece uma oportunidade de aplicação dos bioinsumos para todos os hectares semeados, por meio da aplicação no sulco e/ou no tratamento de sementes. Uma extensa revisão, com 126 ensaios e 380 tratamentos, realizada por Wozniak et al. (2020), que abordou a aplicação de bioestimulantes (quaisquer substâncias naturais ou microrganismos que melhorem o desempenho produtivo) mostraram que 60% das aplicações foram realizadas via pulverização foliar, 30% das aplicações via solo, raízes ou hidroponia e 10% no tratamento de sementes.

Para as doenças radiculares, o tratamento de sementes tem representado a melhor forma de garantir a sobrevivência e o estabelecimento do agente biológico empregado, visto que os exsudatos liberados na germinação da semente suportam o crescimento do microrganismo benéfico, que se desenvolve intimamente associado com as raízes.

No tratamento de sementes é importante levar em consideração a compatibilidade com os produtos químicos, dado que a semente de soja já é comercializada ao produtor com o tratamento com fungicida. Nas situações de incompatibilidade, no qual o princípio ativo químico pode comprometer as células microbianas, a opção mais simples e viável para contornar o problema é a aplicação separada dos produtos, na qual o bioproduto pode ser aplicado via sulco de plantio. Para essa prática o produtor necessita de equipamentos específicos e um maior volume de calda.

Estratégias para avaliação da qualidade da adoção dos bioinsumos no controle de doenças radiculares

Com o estabelecimento dos padrões para controle de qualidade estabelecidos pelo governo não apenas para produtos à base de microrganismos, mas também biofertilizantes, aumento da oferta e principalmente concorrência, temos hoje no mercado produtos com qualidade cada dia melhor, no que diz respeito a eficiência de controle para os diferentes alvos e vida de prateleira. De fato, muitas empresas

se preocupam com a embalagem para acondicionamento dos produtos, que mantêm a temperatura mais amena, transportam seus produtos em caminhões refrigerados e primam por esses mesmos cuidados de acondicionamento no distribuidor. No entanto, nem sempre esse mesmo cuidado acontece por parte do produtor em seu galpão de armazenamento e isso pode comprometer a qualidade dos produtos. Talvez a melhor analogia para se fazer com o produtor para convencê-lo da importância do acondicionamento de produtos biológicos em temperatura mais amena, seja com suas sementes. O produtor sabe bem que as sementes precisam ser acondicionadas em temperatura amena pois se trata de um organismo vivo. Pelo menos para os bioinsumos baseados em microrganismos vivos, essa analogia deve ser a mesma. De fato, muitos produtores já armazenam seus bioinsumos baseados em microrganismos na câmara refrigerada em que armazenam suas sementes e isso lhes garante produtos com maior manutenção de viabilidade.

Afinal, qual o controle de qualidade que devemos primar para um bioinsumo para manejo de doenças fúngicas radiculares? Hoje a viabilidade dos propágulos do microrganismo e a eficiência agrônômica para o alvo são as variáveis que podemos checar para a qualidade dos produtos. No âmbito da ciência podemos elencar algumas outras que retratam essa eficiência e que podem ser implementadas por laboratórios ou mesmo produtores para monitorar a eficiência dos produtos:

- 1) **Atividade de enzimas relacionadas ao parasitismo.** Hoje a quantificação da atividade de enzimas do solo está relacionada à sanidade do solo, são elas a arilsulfatase, beta-glucosidase e fosfatase ácida (Lopes et al., 2013). Além da ciclagem de nutrientes (enxofre, carbono e fósforo, respectivamente), pelo menos a beta-glucosidase está relacionada à atividade parasítica de microrganismos e redução da viabilidade de patógenos habitantes do solo (Janvier et al., 2007) e explica, por exemplo, a supressão a murcha de *Fusarium* em tomateiro (*Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*) (Borrero et al., 2004).
- 2) **Rizocompetência.** Tendo em vista que os patógenos habitantes do solo têm a semente em germinação e as raízes como principal porta de entrada para causar doença, a capacidade dos microrganismos benéficos em colonizar as raízes é fundamental para o sucesso do biocontrole, conforme descreve De Weert e Bloemberg (2007). Os primeiros organismos colonizadores das raízes são as bactérias, em função da rápida multiplicação e mais eficiente utilização dos nutrientes, elas localizam a planta hospedeira por meio dos exsudatos radiculares, aderem à superfície da raiz e secretam uma matriz polissacarídica que as envolve, os chamados biofilmes bacterianos. Essa colonização eficiente das raízes representa pelo menos quatro estratégias importantes de biocontrole: (i) proteção de raízes pelo depósito do biofilme bacteriano (Li et al., 2013), (ii) competição pelos nutrientes que serviriam tanto de quimiotactismo quanto alimento para os fitopatógenos (Yuan et al., 2018), (iii) saturação da solução do solo com moléculas com ação antimicrobiana (Chin-A-Woeng et al., 2000) e (iv) ativação de genes da planta envolvidos na defesa contra fitopatógenos, potencializando a proteção contra a infecção não apenas por patógenos radiculares mas até patógenos que infectam a parte aérea das plantas (Klopper et al., 1999).
- 3) **Parasitismo de estruturas de resistência.** Conforme mencionado acima neste capítulo, todos os patógenos radiculares formam algum tipo de estrutura de resistência que garante sobrevivência do microrganismo mesmo na ausência de qualquer planta hospedeira, substrato ou condições

ambientais adversas ao crescimento fúngico. Dentre as estruturas de resistência (Tabela 1), os escleródios são aquelas mais facilmente parasitadas e esse parasitismo está relacionado com a redução na severidade da doença. Pelo menos para *Rhizoctonia solani*, *Macrophomina phaseolina* e *Athelia rolfsii* que formam escleródios (Tabela 1), já foi relatado o potencial de agentes de biocontrole em seu parasitismo (Elad et al., 1980; Srivastava et al., 1996), mas nem sempre é demonstrado o potencial desse parasitismo na redução da severidade da doença que cada um causa em soja.

- 4) **Competição por substrato.** Além da competição pelos exsudatos radiculares, a competição pelos restos culturais também representa uma importante estratégia para o controle biológico de doenças radiculares (Katan et al., 2017). Por mais que esses patógenos formem estruturas de resistência, a colonização dos restos culturais representa uma multiplicação secundária e aumentos dos riscos de epidemia. Pode-se mensurar a capacidade de colonização dos restos culturais pelo agente de controle biológico como estratégia de prevenir a colonização pelo patógeno ou para reduzir sua esporulação quando o substrato já está colonizado pelo patógeno (Köhl et al., 1995). Nesse último caso, a relação parasítica não é tão importante quanto o crescimento rápido sobre o substrato (Köhl et al., 1997) mas é importante mencionar que esse deve ser um mecanismo de avaliação da eficiência do bioinsumo e não um método para selecionar o agente de biocontrole mais promissor (Köhl et al., 2020).
- 5) **Tolerância ou compensação de perdas.** A promoção de crescimento de plantas mediada por microrganismos representa também um mecanismo de controle biológico de doenças radiculares, tendo em vista que pode compensar as perdas proporcionadas pelos patógenos. O maior desenvolvimento de raízes, aumento da absorção de nutrientes, particularmente aqueles envolvidos na defesa de plantas contra os patógenos radiculares e aumento da tolerância a estresses abióticos são alguns dos exemplos que podem ser citados para a importância da participação da promoção de crescimento de plantas na proteção contra patógenos radiculares. Importante mencionar que este mecanismo não leva ao controle da doença e pode até levar a um aumento no potencial de inóculo ao longo do tempo. Seguindo neste cenário, em algum momento, a promoção de crescimento pode não superar as perdas e a adoção do bioinsumo ser, portanto, sem efeito.
- 6) **Homeostase microbiana.** Alguns conceitos de seletividade e interações multitróficas já são abordadas há muitos anos na Entomologia, mas só com o advento das técnicas de biologia molecular este tópico está sendo estudado e alguns serviços de análise de microbioma e interpretação já estão sendo propostos, como por exemplo para identificar o padrão microbiano associado ao *terroir* de vinhos (Belda et al., 2017). Quando se introduz um microrganismo e/ou uma molécula no solo pode-se ter muito mais que a ação direta desse bioinsumo sobre o patógeno. Além da supressão a fitopatógenos apresentados acima (itens 1-5), Berg et al. (2021) propuseram outros efeitos dos bioinsumos introduzido no solo com o microbioma nativo que resultam no maior desenvolvimento de plantas e/ou controle de doenças para os quais ainda não se têm ferramentas para mensuração em rotina, mas que podem representar métricas importantes a serem consideradas quando se mede a eficiência do bioinsumo para proteção de plantas não

apenas contra doenças radiculares causadas por fungos como as causadas por outros agentes fitopatogênicos e em outros nichos. A seguir detalhamos cada um desses mecanismos de ação propostos para os bioinsumos.

- (a) Desvio transitório do microbioma: quando se introduz um microrganismo ou molécula, há um aumento momentâneo do microrganismo introduzido, um benefício de redução da doença e, em seguida, a doença é reduzida e o microbioma nativo volta a colonizar o nicho.
- (b) Estabilização ou aumento da diversidade e uniformidade microbiana associada às plantas: com a introdução do bioinsumo, se cria um ambiente propício para colonização por outros microrganismos benéficos. Essa característica está relacionada tanto com a comunicação entre microrganismos (*quorum sensing*) quanto pela seletividade aos outros organismos.
- (c) Restabelecimento do microbioma benéfico após alteração induzida por fitopatógeno: os patógenos necrotróficos produzem moléculas com ação antimicrobiana para lhe garantir colonização exclusiva da planta, a introdução de bioinsumos que possam atuar na recolonização desse nicho, atuando por competição e/ou detoxificando as moléculas com ação antimicrobiana não apenas permitem a colonização do substrato pelo microrganismo introduzido como também reestabelece as condições para a colonização dos restos culturais pelo microbioma nativo.
- (d) Alterações direcionadas para comunidades microbianas que proporcionam benefícios às plantas: com a introdução do bioinsumo pode-se aumentar seletivamente a comunidade de microrganismos envolvidos no biocontrole como por exemplo a aplicação de quitina e o aumento seletivo da comunidade de microrganismos com ação quitinolítica e aumento da supressão de fungos fitopatogênicos habitantes do solo.

Portanto, os bioinsumos representam uma ferramenta fundamental para o manejo de doenças de plantas. Temos uma diversidade de produtos, há novos lançamentos a cada ano e o produtor está cada dia mais convencido de sua eficiência de controle.

Se por um lado hoje há uma diversidade de produtos disponíveis e com qualidade cada vez maior, ainda se sabe pouco sobre a extensão dos danos das doenças radiculares. O foco maior tem sido dado aos nematoides mas ainda pouca atenção tem sido dada aos fungos. Um conhecimento sobre a etiologia das perdas e sua quantificação deve ser o primeiro passo para busca da solução correta, sua introdução no momento adequado e acompanhamento da sua performance ao longo do tempo.

De forma geral, para o manejo das doenças radiculares, raramente uma única estratégia deve ser adotada, mas tantas quando possíveis para garantir o sucesso da produção.

Para doenças foliares da soja o produtor já está convencido da importância de combinar estratégias, este manejo integrado tem que fazer parte também das doenças radiculares, o que pode inclusive beneficiar o manejo de doenças da parte aérea como redução do inóculo de patógenos necrotróficos associados aos restos culturais e auxílio na proteção com a ativação da resistência sistêmica de plantas.

Referências

- AJAYI-OYETUNDE, O. O.; BRADLEY, C. A. *Rhizoctonia solani*: taxonomy, population biology and management of rhizoctonia seedling disease of soybean. *Plant Pathology*, v. 67, n. 1, p. 3-17, 2018.
- AKULA, R.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling & Behavior*, v. 6, n. 11, p. 1720-1731, 2011.
- AL-ANI, R. A.; ADHAB, M. A.; MAHDI, M. H.; ABOOD, H. M. *Rhizobium japonicum* as a biocontrol agent of soybean root rot disease caused by *Fusarium solani* and *Macrophomina phaseolina*. *Plant Protection Science*, v. 48, n. 4, p. 149-155, 2012.
- ALAM, M. Z.; BRAUN, G.; NORRIE, J.; HODGES, D. M. Effect of Ascophyllum extract application on plant growth, fruit yield and soil microbial communities of strawberry. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 93, n. 1, p. 23-36, 2013.
- ALLEN, T. W.; BRADLEY, C. A.; SISSON, A. J.; BYAMUKAMA, E.; CHILVERS, M. I.; COKER, C. M.; COLLINS A. A.; DAMICONE, J. P.; DORRANCE, A. E.; DUFAULT, N. S.; ESKER, P. D.; FASKE, T. R.; GIESLER, L. J.; GRYBAUSKAS, A. P.; HERSHMAN, D. E.; HOLLIER, C. A.; ISAKETT, T.; JARDINE, D. J.; KELLY, H. M.; KEMERAIT, R. C.; KLECZEWSKI, N. M.; KOENNING, S. R.; KURLE, J. E.; MALVICK, D. K.; MARKELL, S. G.; MEHL, H. L.; MUELLER, D. S.; MUELLER, J. D.; MULROONEY, R. P.; NELSON, B. D.; NEWMAN, M. A.; OSBORNE, L.; OVERSTREET, C.; PADGETT, G. B.; PHUPPS, P. M.; PRICE, P. P.; SIKORA, E. J.; SMITH, D. L.; SPURLOCK, T. N.; TANDE, C. A.; TENUTA, A. U.; WISE, K. A.; WRATHER, J. A. Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2010 to 2014. *Plant Health Progress*, v. 18, n. 1, p. 19-27, 2017.
- AOKI, T.; O'DONNELL, K.; SCANDIANI, M. M. Sudden death syndrome of soybean in South America is caused by four species of *Fusarium*: *Fusarium brasiliense* sp. nov., *F. cuneirostrum* sp. nov., *F. tucumaniae*, and *F. virguliforme*. *Mycoscience*, v. 46, n. 3, p. 162-183, 2005.
- BELDA, I.; ZARRAONAINDIA, I.; PERISIN, M.; PALACIOS, A.; ACEDO, A. Corrigendum: From vineyard soil to wine fermentation: Microbiome approximations to explain the “terroir” concept. *Frontiers in Microbiology*, v. 8, p. 1065, 2017.
- BERG, G.; KUSSTATSCHER, P.; ABDELFAHATTA, A.; CERNAVA, T.; SMALLA, K. Microbiome modulation—toward a better understanding of plant microbiome response to microbial inoculants. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, p. 803, 2021.
- BERG, G. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 84, n. 1, p. 11-18, 2009.
- BORRERO, C.; TRILLAS, M. I.; ORDOVÁS, J.; TELLO, J. C.; AVILÉS, M. Predictive factors for the suppression of *Fusarium* wilt of tomato in plant growth media. *Phytopathology*, v. 94, n. 10, p. 1094-1101, 2004.
- BRODERS, K. D.; LIPPS, P. E.; PAUL, P. A.; DORRANCE, A. E. Characterization of *Pythium* spp. associated with corn and soybean seed and seedling disease in Ohio. *Plant Disease*, v. 91, n. 6, p. 727-735, 2007.
- CAI, L.; GIRAUD, T.; ZHANG, N.; BEGEROW, D.; CAI, G.; SHIVAS, R. G. The evolution of species concepts and species recognition criteria in plant pathogenic fungi. *Fungal Diversity*, v. 50, n. 1, p. 121-133, 2011.
- CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2014.
- CHAKRABORTY, U.; PURKAYASTHA, R. P. Role of rhizobitoxine in protecting soybean roots from *Macrophomina phaseolina* infection. *Canadian Journal of Microbiology*, v. 30, n. 3, p. 285-289, 1983.
- CHIN-A-WOENG, T. F.; BLOEMBERG, G. V.; MULDER, I. H.; DEKKERS, L. C.; LUGTENBERG, B. J. Root colonization by phenazine-1-carboxamide-producing bacterium *Pseudomonas chlororaphis* PCL1391 is essential for biocontrol of tomato foot and root rot. *Molecular plant-microbe interactions*, v. 13, n. 12, p. 1340-1345, 2000.
- CHOUDHARY, D. K.; JOHRI, B. N. Interactions of *Bacillus* spp. and plants with special reference to induced systemic resistance (ISR). *Microbiological Research*, v. 164, n. 5, p. 493-513, 2009.
- CONSELVAN, G. B.; PIZZEGHELLO, D.; FRANCIOSO, O.; DI FOGGIA, M.; NARDI, S.; CARLETTI, P. Biotimulant activity of humic substances extracted from leonardites. *Plant and Soil*, v. 420, n. 1, p. 119-134, 2017.
- DE WEERT, S.; BLOEMBERG, G. V. Rhizosphere competence and the role of root colonization in biocontrol. In: GNANAMANICKAM, S. S. *Plant-associated bacteria*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 317-333.
- DUFFY, B. K.; DÉFAGO, G. Zinc improves biocontrol of *Fusarium* crown and root rot of tomato by *Pseudomonas fluorescens* and represses the production of pathogen metabolites inhibitory to bacterial antibiotic biosynthesis. *Phytopathology*, v. 87, n. 12, p. 1250-1257, 1997.
- DUFFY, B.; SCHOUTEN, A.; RAAIJMAKERS, J. M. Pathogen self-defense: mechanisms to counteract microbial antagonism. *Annual review of phytopathology*, v. 41, n. 1, p. 501-538, 2003.

- DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 3-14, 2015.
- ELAD, Y.; CHET, I.; KATAN, J. *Trichoderma harzianum*: a biocontrol agent effective against *Sclerotium rolfsii* and *Rhizoctonia solani*. *Phytopathology*, v. 70, n. 2, p. 119-121, 1980.
- ELLIS, M. L.; JIMENEZ, D. R. C.; LEANDRO, L. F.; MUNKVOLD, G. P. Genotypic and phenotypic characterization of fungi in the *Fusarium oxysporum* species complex from soybean roots. *Phytopathology*, v. 104, n. 12, p. 1329-1339, 2014.
- FENTON, A. M.; STEPHENS, P. M.; CROWLEY, J.; O'CALLAGHAN, M.; O'GARA, F. Exploitation of gene (s) involved in 2, 4-diacetylphloroglucinol biosynthesis to confer a new biocontrol capability to a *Pseudomonas* strain. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 58, n. 12, p. 3873-3878, 1992.
- GAO, X.; LU, X.; WU, M.; ZHANG, H.; PAN, R.; TIAN, J.; LI, S.; LIAO, H. Co-inoculation with rhizobia and AMF inhibited soybean red crown rot from field study to plant defense-related gene expression analysis. *PLoS One*, v. 7, n. 3, p. e33977, 2012.
- GLICK, B. R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian journal of microbiology*, v. 41, n. 2, p. 109-117, 1995.
- GLICK, B. R.; PASTERNAK, J. J.; PATTEN, C. L. Plant growth promoting bacteria. In: GLICK, B. R.; PASTERNAK, J. J.; PATTEN, C. L. (Eds.). *Molecular biotechnology: principles and applications of recombinant DNA*. 4 ed. Washington: ASM Press. 2010. p. 599-651.
- GÓMEZ EXPÓSITO, R.; DE BRUIJN, I.; POSTMA, J.; RAAIJMAKERS, J. M. Current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils. *Frontiers in Microbiology*, v. 8, p. 2529, 2017.
- GUERINOT, M. L.; MEIDL, E. J.; PLESSNER, O. Citrate as a siderophore in *Bradyrhizobium japonicum*. *Journal of Bacteriology*, v. 172, n. 6, p. 3298-3303, 1990.
- GUPTA, G. K.; SHARMA, S. K.; RAMTEKE, R. Biology, epidemiology and management of the pathogenic fungus *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid with special reference to Charcoal Rot of Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Journal of Phytopathology*, v. 160, n. 4, p. 167-180, 2012.
- HARTMAN, G. L.; SINCLAIR, J. B.; AND RUPE, J. C. (Eds.). *Compendium of soybean diseases*. St. Paul, MN: American Phytopathological Society, 1999. 100 p.
- HILDEBRANDT, T. M.; NUNES NESI, A.; ARAÚJO, W. L.; AND BRAUN, H. P. Amino Acid catabolism in plants. *Molecular Plant*, v. 8, p. 1563-1579, 2015.
- HILLOCKS, R. J.; WALKER, J. M. Soilborne diseases and their importance in tropical agriculture. In: HILLOCKS, R.J.; WALLER, J.M. (Eds.) *Soilborne diseases of tropical crops*. Walingford, UK: CAB International, 1997. p. 365-376.
- HOITINK, H. A. J.; BOEHM, M. J. Biocontrol within the context of soil microbial communities: a substrate-dependent phenomenon. *Annual Review of Phytopathology*, v.37, n. 1, p. 427-446, 1999.
- ILLERA-VIVES, M.; LÓPEZ-FABAL, A.; LÓPEZ-MOSQUERA, M. E.; RIBEIRO, H. M. Mineralization dynamics in soil fertilized with seaweed-fish waste compost. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, n. 15, p. 3047-3054, 2015.
- IQUEBAL, M. A.; TOMAR, R. S.; PARAKHIA, M. V.; SINGLA, D.; JAISWAL, S.; RATHOD, V. M.; PADHIYAR, S.; KUMAR, N.; RAI, A.; KUMAR, D. Draft whole genome sequence of groundnut stem rot fungus *Athelia rolfsii* revealing genetic architect of its pathogenicity and virulence. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-05478-8
- JANVIER, C.; VILLENEUVE, F.; ALABOUVETTE, C.; EDEL-HERMANN, V.; MATEILLE, T.; STEINBERG, C. Soil health through soil disease suppression: which strategy from descriptors to indicators? *Soil biology and Biochemistry*, v. 39, n. 1, p. 1-23, 2007.
- JENKINS, R.; JAIN, C. K. *Advances in soil-borne plant diseases*. Jaipur, India: Oxford Book Company, 2010. 285 p.
- KATAN, J. Diseases caused by soilborne pathogens: biology, management and challenges. *Journal of Plant Pathology*, v. 99, n. 2, p. 305-315, 2017.
- KHAN, S.; BASRA, S. M. A.; NAWAZ, M.; HUSSAIN, I.; FOIDL, N. Combined application of moringa leaf extract and chemical growth-promoters enhances the plant growth and productivity of wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *South African Journal of Botany*, v. 129, p. 74-81, 2020.
- KHAN, W.; PALANISAMY, R.; CRITCHLEY, A. T.; SMITH, D. L.; PAPADOPOULOS, Y.; PRITHIVIRAJ, B. *Ascophyllum nodosum* extract and its organic fractions stimulate rhizobium root nodulation and growth of *Medicago sativa* (Alfalfa). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 44, p. 900-908, 2013.
- KHAN, W.; RAYIRATH, U. P.; SUBRAMANIAN, S.; JITHESH, M. N.; RAYORATH, P.; HODGES, D. M.; CRITCHLEY, A. T.; CRAIGIE, J. S.; NORRIE, J.; PRITHIVIRAJ, B. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 28, n. 4, p. 386-399, 2009.
- KISHORE, G. K.; PANDE, S.; PODILE, A. R. *Pseudomonas aeruginosa* GSE 18 inhibits the cell wall degrading enzymes of *Aspergillus niger* and activates defence-related enzymes of groundnut in control of collar rot disease. *Australasian Plant Pathology*, v. 35, n. 2, p. 259-263, 2006.
- KLOEPPER, J. W.; RODRIGUEZ-KABANA, R.; ZEHNDER, A. W.; MURPHY, J. F.; SIKORA, E.; FERNANDEZ, C. Plant root-bacterial interactions in biological control of soilborne diseases and potential extension to systemic and foliar diseases. *Australasian Plant Pathology*, v. 28, n. 1, p. 21-26, 1999.

- KÖHL, J.; BELANGER, R. R.; FOKKEMA, N. J. Interaction of four antagonistic fungi with *Botrytis aclada* in dead onion leaves: a comparative microscopic and ultrastructural study. *Phytopathology*, v. 87, n. 6, p. 634-642, 1997.
- KÖHL, J.; MEDEIROS, F. H.; LOMBAERS-VAN DER PLAS, C.; GROENENBOOM-DE HAAS, L.; VAN DEN BOSCH, T. Efficacies of bacterial and fungal isolates in biocontrol of *Botrytis cinerea* and *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* and growth promotion in tomato do not correlate. *Biological Control*, v. 150, e104375, 2020. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2020.104375.
- KÖHL, J.; MOLHOEK, W. M.; VAN DER PLAS, C. H.; FOKKEMA, N. J. Suppression of sporulation of *Botrytis* spp. as a valid biocontrol strategy. *European Journal of Plant Pathology*, v. 101, n. 3, p. 251-259, 1995.
- LANUBILE, A.; ELLIS, M. L.; MAROCCO, A.; MUNKVOLD, G. P. Association of effector six 6 with vascular wilt symptoms caused by *Fusarium oxysporum* on soybean. *Phytopathology*, v. 106, n. 11, p. 1404-1412, 2016.
- LI, S.; ZHANG, N.; ZHANG, Z.; LUO, J.; SHEN, B.; ZHANG, R.; SHEN, Q. Antagonist *Bacillus subtilis* HJ5 controls *Verticillium* wilt of cotton by root colonization and biofilm formation. *Biology and fertility of soils*, v. 49, n. 3, p. 295-303, 2013.
- LIN, F.; WANI, S. H.; COLLINS, P. J.; WEN, Z.; LI, W.; ZHANG, N.; MCCOY, A. G.; BI, Y.; TAN, R.; ZHANG, S.; GU, C.; CHILVERS M. I.; WANG, D. QTL mapping and GWAS for identification of loci conferring partial resistance to *Pythium sylvaticum* in soybean (*Glycine max* (L.) Merr). *Molecular Breeding*, v. 40, p. 1-11, 2020.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013.
- MACHADO, L. P.; GASPAROTO, M. C. G.; ALVES, N. Seaweeds in the control of plant diseases and insects. In: PEREIRA, L.; BAHCEVANDZIEV, K.; JOSHI, N. H. (Eds.). *Seaweeds as plant fertilizer, agricultural biostimulants and animal fodder*. Boca Raton: CRC Press, 2019. p. 100-127.
- MASTOURI, F.; BJÖRKMANN, T.; HARMAN, G. E. *Trichoderma harzianum* enhances antioxidant defense of tomato seedlings and resistance to water deficit. *Molecular plant-microbe interactions*, v. 25, n. 9, p. 1264-1271, 2012.
- MATTHIENSEN, R. L.; ROBERTSON, A. E. Comparison of aggressiveness and fungicide sensitivity of four *Pythium* spp. that cause damping-off of soybean in the United States. *Canadian Journal of Plant Pathology*, v. 43, n. 5, p. 769-782, 2021. DOI: 10.1080/07060661.2021.1881162.
- MAUCH, F.; MAUCH-MANI, B.; BOLLER, T. Antifungal hydrolases in pea tissue: II. Inhibition of fungal growth by combinations of chitinase and -1, 3-glucanase. *Plant Physiology*, v. 88, n. 3, p. 936-942, 1988.
- MONTE, E.; BETTIOL, W.; HERMOSA, R. *Trichoderma* e seus mecanismos de ação para o controle de doenças de plantas. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (Eds.). *Trichoderma: uso na agricultura*. Brasília: Embrapa, 2019. p. 181-199.
- MICHEREFF, S. J.; ANDRADE, D. E. G. T.; MENEZES, M. *Ecologia e manejo de patógenos radiculares em solos tropicais*. 1 ed. Recife: Imprensa Universitária da Universidade Federal Rural de Pernambuco. v. 1, 2005. 398 p.
- MILLER, A. J.; FAN, X.; SHEN, Q.; SMITH, S. J. Amino acids and nitrate as signals for the regulation of nitrogen acquisition. *Journal of Experimental Botany*, v. 59, p. 111-119, 2007.
- NAMBIAR, P. T. C.; SIVARAMAKRISHNAN, S. Detection and assay of siderophores in cowpea rhizobia (*Bradyrhizobium*) using radioactive Fe (59Fe). *Letters in Applied Microbiology*, v. 4, n. 2, p. 37-40, 1987.
- NEGREIROS, A. M. P.; SALES JÚNIOR, R.; LEÓN, M.; MELO, N. J. A.; MICHEREFF, S. J.; AMBRÓSIO, M. M. Q.; MEDEIROS, H. L. S.; ARMENGOL, J. Identification and pathogenicity of *Macrophomina* species collected from weeds in melon fields in Northeastern Brazil. *Journal of Phytopathology*, v. 167, n. 6, p. 326-337, 2019. DOI: 10.1111/jph.12801
- NELSON, E. B. Microbial dynamics and interactions in the spermosphere. *Annual Review of Phytopathology*, v. 42, p. 271-309, 2004.
- O'KEEFE, E.; HUGHES, H.; MCLOUGHLIN, P.; TAN, S. P. Antibacterial activity of seaweed extracts against plant pathogenic bacteria. *Journal of Bacteriology and Mycology*, v.6, n. 3., p. 1105, 2019.
- O'SULLIVAN, D. J.; O'GARA, F. Traits of fluorescent *Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiological Reviews*, v. 56, n. 4, p. 662-676, 1992.
- OMAR, S. A.; ABD-ALLA, M. H. Biocontrol of fungal root rot diseases of crop plants by the use of rhizobia and bradyrhizobia. *Folia Microbiologica*, v. 43, n. 4, p. 431-437, 1998.
- PENG, D.; LI, S.; WANG, J.; CHEN, C.; ZHOU, M. Integrated biological and chemical control of rice sheath blight by *Bacillus subtilis* NJ-18 and jinggangmycin. *Pest Management Science*, v. 70, n. 2, p. 258-263, 2014.
- PERSAUD, R.; KHAN, A.; ISAAC, W. A.; GANPAT, W.; SARAVANAKUMAR, D. Plant extracts, bioagents and new generation fungicides in the control of rice sheath blight in Guyana. *Crop Protection*, v. 119, p. 30-37, 2019.
- PERSELLO-CARTIEAUX, F.; NUSSAUME, L.; ROBAGLIA, C. Tales from the underground: molecular plant-rhizobacteria interactions. *Plant, Cell & Environment*, v. 26, n. 2, p. 189-199, 2003.

- PIERSON III, L. S.; THOMASHOW, L. S. Cloning and heterologous expression of the phenazine biosynthetic. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, v. 5, p. 330-339, 1992.
- PRASAD, R.; KUMAR, M.; VARMA, A. Role of PGPR in soil fertility and plant health. In: EGAMBERDIEVA, D.; SHRIVASTAVA, S.; VARMA, A. (Eds.) **Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and medicinal plants**. Switzerland: Springer, Cham., 2015. p. 247-260. DOI: 10.1007/978-3-319-13401-7
- RILEY, M. A.; WERTZ, J. E. Bacteriocins: evolution, ecology, and application. *Annual Reviews in Microbiology*, v. 56, n. 1, p. 117-137, 2002.
- ROY, K. W.; HERSHMAN, D. E.; RUPE, J. C.; ABNEY, T. S. Sudden death syndrome of soybean. *Plant Disease*, v. 81, n. 10, p. 1100-1111, 1997.
- RUSSIANO, M. C. S. **Potencial antagonista de *Bradyrhizobium* spp. sobre patógenos de solo na cultura da soja**. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Produção Vegetal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.
- SANTOS, K. M.; LIMA, G.S.; BARROS, A.P.O.; MACHADO, A.R.; SOUZA-MOTTA, C.M.; CORREIA, K.C.; MICHEREFF, S.J. Novel specific primers for rapid identification of *Macrophomina* species. *European Journal of Plant Pathology*, v. 156, p. 1213-1218, 2020.
- SCANDIANI, M. M.; CARMONA, M. A.; LUQUE, A. G.; MATOS, K. S.; LENZI, L.; FORMENTO, A. N.; MARTINEZ, C. V.; FERRI, M. R.; PICCOLO, K. L.; TARTABINI, M.; ALVAREZ, D.; SAUTUA, F. Isolation, identification and yield losses associated with Sudden death syndrome in soybeans in Argentina. *Tropical Plant Pathology*, v. 37, n. 5, p. 358-362, 2012.
- SENTHILKUMAR, M.; SWARNALAKSHMI, K.; GOVINDASAMY, V.; LEE, Y. K.; ANNAPURNA, K. Biocontrol potential of soybean bacterial endophytes against charcoal rot fungus, *Rhizoctonia bataticola*. *Current microbiology*, v. 58, n. 4, p. 288-293, 2009.
- SIDDIQUI, Z. A.; SINGH, L. P. Effects of soil inoculants on the growth, transpiration and wilt disease of chickpea. *Journal of Plant Diseases and Protection*, v. 111, n. 2, p. 151-157, 2004.
- SHAHABIVAND, S.; PADASH, A.; AGHAEI, A.; NASIRI, Y.; FATHI REZAEI, P. Plant biostimulants (*Funneliformis mosseae* and humic substances) rather than chemical fertilizer improved biochemical responses in peppermint. *Iranian Journal of Plant Physiology*, v. 8, n. 2, p. 2333-2344, 2018.
- SOURI, M. K. **Chelates and amino-chelates, and their role in plant nutrition**. Tehran: Agriculture Education and Extension Press, 2015. 172 p.
- SRIVASTAVA, A. K.; ARORA, D. K.; GUPTA, S.; PANDEY, R. R.; LEE, M. W. Diversity of potential microbial parasites colonizing sclerotia of *Macrophomina phaseolina* in soil. *Biology and fertility of soils*, v. 22, n. 1, p. 136-140, 1996.
- WALCH-LIU, P.; FORDE, B. G. Glutamate as a novel modifier of root growth and branching. What's the sensor? *Plant Signaling Behavior*, v. 2, p. 284-286, 2007.
- WEILAND, M.; MANCUSO, S.; BALUSKA, F. Signalling via glutamate and GLRs in *Arabidopsis thaliana*. *Functional Plant Biology*, v. 43, n. 1, p. 1-25, 2015.
- WEINDLING, R. *Trichoderma lignorum* as a parasite of other soil fungi. *Phytopathology*, v. 22, n. 8, p. 837-845, 1932.
- WHIPPS, J. M. Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of experimental Botany*, v. 52, suppl. 1, p. 487-511, 2001.
- WOZNIAK, E.; BLASZCZAK, A.; WIATRAC, P.; CANADY, M. Biostimulant mode of action: impact of biostimulant on whole-plant level. In: GEELEN, D.; XU, L. **The Chemical Biology of Plant Biostimulants**, 2020. p. 205-227. DOI: 10.1002/9781119357254.ch8
- WRATHER, J. A.; ANDERSON, T. R.; ARSYAD, D. M.; GAI, J.; PLOPER, L. D.; PORTIA-PUGLIA, A.; RAM, H. H.; YORINORI, J. T. Soybean disease loss estimates for the top 10 soy-bean producing countries in 1994. *Plant Disease*, v. 81, p. 107-110, 1997.
- XU, W.; WANG, K.; WANG, H.; LIU, Z.; SHI, Y.; GAO, Z.; WANG, Z. Evaluation of the biocontrol potential of *Bacillus* sp. WB against *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*. *Biological Control*, v. 147, e 104288, 2020. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2020.104288
- YUAN, J.; RAZA, W.; SHEN, Q. Root exudates dominate the colonization of pathogen and plant growth-promoting rhizobacteria. In: SINGH, D. P.; GUPTA, V. K.; PRABHA, R. (Eds.). **Root Biology**. Singapore: Springer, 2018. p. 167-180.
- ZITNICK-ANDERSON, K. K.; NELSON JR, B. D. Identification and pathogenicity of *Pythium* on soybean in North Dakota. *Plant Disease*, v. 99, n. 1, p. 31-38, 2015.