

Biofilmes Benéficos de Microrganismos na Rizosfera de Plantas

Introdução. Diversos microrganismos benéficos formam *biofilmes* nas raízes das plantas, criando comunidades aderidas que melhoram a colonização e a interação planta-microrganismo. Esses biofilmes consistem em células microbianas envoltas por matrizes de exopolissacarídeos e proteínas, ajudando os microrganismos a aderir às superfícies radiculares e resistir a estresses ambientais ¹ ². Na agricultura, bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR) e fungos entomopatogênicos colonizam a rizosfera e podem aumentar a produtividade, reduzir doenças e até controlar pragas de forma natural. A seguir, exploramos pesquisas de laboratório e campo envolvendo alguns desses microrganismos – desde bactérias fixadoras de nitrogênio até agentes de biocontrole – destacando seus biofilmes e efeitos em plantas. Também indicamos **onde** cada microrganismo tem sido estudado e **quais ganhos foram observados**, inclusive em produtividade e redução de danos por doenças ou pragas.

Azospirillum brasilense – Biofilme e Crescimento Vegetal

Azospirillum brasilense é uma bactéria promotora de crescimento muito estudada, especialmente no Brasil e América do Sul, por sua associação com raízes de gramíneas (como milho e trigo). Ela fixa nitrogênio atmosférico e produz fitormônios, estimulando o desenvolvimento radicular e a tolerância a estresses ³ ⁴. Estudos mostram que *A. brasilense* forma biofilmes na superfície das raízes, auxiliando na colonização eficiente. Por exemplo, a cepa Ab-V5 – isolada em laboratórios brasileiros – adere às raízes de milho e aumenta a massa de raiz e o teor de clorofila, melhorando a absorção de nutrientes ⁴. Em **ensaios de campo**, a inoculação de sementes com *A. brasilense* gerou ganhos médios de **10% na produtividade de grãos** em milho e outros cereais ³. Além disso, a combinação de *A. brasilense* com outras bactérias (como *Pseudomonas fluorescens*) elevou a biomassa e o rendimento do milho sob estresse de herbicida, demonstrando sinergia positiva ⁵. No trigo e no arroz, esse microrganismo também conferiu maior tolerância à seca e salinidade, graças em parte à formação de biofilme e produção de polímeros extracelulares que retêm água na raiz ⁶ ¹. Essas pesquisas – muitas conduzidas por instituições como a Embrapa no Brasil e universidades argentinas – respaldam o uso de *A. brasilense* como inoculante comercial para aumentar o enraizamento e a produtividade de culturas de forma sustentável.

Bacillus amyloliquefaciens – Biocontrole e Promoção de Crescimento

Bacillus amyloliquefaciens é uma bactéria do solo endófito encontrada em rizosferas pelo mundo (incluindo solo de hortaliças na Ásia e solos tropicais). Ela produz uma gama de metabólitos (lipopeptídeos como surfactina, enzimas líticas, sideróforos, ácido indol-acético, etc.) que lhe conferem dupla função: controlar patógenos e estimular o crescimento vegetal ⁷ ⁸. Um traço marcante é sua **formação de biofilme robusto** nas raízes, que facilita a competição por espaço e nutrientes frente a patógenos ². Estudos de laboratório na China demonstraram que mutantes de *B. amyloliquefaciens* incapazes de formar biofilme colonizam menos a raiz e conferem menor resistência à seca em tomate ⁹ ¹⁰. Por outro lado, variantes “hiperbiofilme” aumentaram significativamente a sobrevivência das plantas sob estresse hídrico ¹⁰. Em ensaios de **campo**, esta espécie tem mostrado benefícios notáveis:

por exemplo, uma formulação combinando *B. amyloliquefaciens* e *B. subtilis* aplicada em tubérculos de batata na Rússia suprimiu a doença Rhizoctonia e elevou o rendimento de batatas em **8,2 toneladas/ha**, aumentando também o tamanho dos tubérculos em 1,8 vez em relação ao controle ¹¹ ¹². Esse ganho expressivo de produtividade reflete sua capacidade de **proteger as raízes contra patógenos de solo e melhorar a nutrição**. Não à toa, *B. amyloliquefaciens* está presente em diversos biofertilizantes e biopesticidas comerciais (na Europa e Ásia) e é alvo de pesquisas para desenvolvimento de biofilmes formulados como inoculantes agrícolas.

***Bacillus pumilus* – Controle de Doenças Radiculares**

Bacillus pumilus ocorre em solos agrícolas de diversos continentes (por exemplo, foi isolado de rizosferas no Egito, Índia e Brasil) e destaca-se pela **ação contra doenças de raiz**. Essa bactéria forma esporos resistentes e produz compostos antimicrobianos. Em experimentos egípcios com morangueiro, isolados de *B. pumilus* aderidos às raízes (auxiliados por goma arábica para melhorar o biofilme) suprimiram severamente o complexo de **podridão negra das raízes** causado por *Rhizoctonia*, *Fusarium* e *Pythium* ¹³ ¹⁴. Os resultados de dois anos de campo foram impressionantes: as bactérias reduziram a incidência da doença em ~65% e **aumentaram a produtividade de morangos em 66–73%** comparado ao controle, desempenho equivalente ao fungicida químico utilizado ¹⁵. Esse ganho de colheita ocorre porque as plantas tratadas apresentaram sistema radicular mais saudável e vigoroso. Estudos similares na Ásia relataram que *B. pumilus* pode produzir fitormônios e solubilizar fosfato, contribuindo para o crescimento, além de induzir resistência sistêmica nas plantas contra patógenos. A formação de biofilme por *B. pumilus* – incluindo a secreção de ácidos e toxinas adesivas – é apontada como fator importante para sua fixação nas raízes e proteção duradoura do hospedeiro ¹⁶. Devido a esses resultados positivos (Egito, Índia) na redução de doenças radiculares e aumento de rendimento, *B. pumilus* é considerado um agente promissor para manejo biológico de doenças de solo em culturas hortícolas e de grãos.

***Bacillus subtilis* – Biofilme Protetor e Vigor de Plantas**

Bacillus subtilis é talvez a PGPR mais amplamente estudada no mundo, encontrada em solos desde os trópicos (Brasil, Índia) até regiões temperadas (Europa, EUA). Ela é conhecida por formar biofilmes multicelulares robustos em superfícies sólidas – incluindo raízes – que ajudam a proteger plantas contra infecções e estresses ¹⁷ ¹⁸. Quando percebem exsudatos das raízes (como sacarose ou ácidos orgânicos), células de *B. subtilis* iniciam movimento coordenado e produzem polímeros como levanose e ácido γ -poliglutâmico, cimentando-se em biofilme sobre a raiz ¹⁷. Esses biofilmes atuam como uma barreira viva contra patógenos do solo e como fonte local de fitormônios e nutrientes para a planta. Ensaio em planta modelo (*Arabidopsis*) mostraram que *B. subtilis* rapidamente se adapta à rizosfera, diferenciando células especializadas no biofilme que promovem crescimento radicular e resistência a patógenos ¹⁷ ¹⁹. Em campo, diversas formulações comerciais à base de *B. subtilis* (ex.: QST 713 nos EUA, Serenade®) têm sido empregadas para controle de doenças foliares e de solo. Por exemplo, na Índia a aplicação de *B. subtilis* no solo controla tombamento e murcha em leguminosas e bananeira ²⁰. Com frequência, o uso de *B. subtilis* resulta em melhoria do crescimento e produtividade: consórcios brasileiros testaram *B. subtilis* em milho e observaram **aumento de até 16% na produção de grãos** em determinados solos ²¹. Além disso, quando combinada a outras *Bacillus*, pôde elevar em >20% a biomassa de batata e outros tubérculos ²². A ampla adaptabilidade de *B. subtilis* – formando esporos duráveis e colonizando raízes via biofilme – explica seu sucesso como bioinoculante multiuso, capaz de **promover crescimento e suprimir patógenos** em sistemas agrícolas de várias partes do mundo.

***Bacillus thuringiensis* – Bioinseticida e Proteção de Cultivos**

Conhecida por suas aplicações como bioinseticida, *Bacillus thuringiensis* (Bt) também pode colonizar o ambiente radicular de plantas, embora em menor grau que outras *Bacillus* ²³. Essa bactéria produz cristais proteicos (*toxinas Cry*) letais para inúmeras pragas, sobretudo lagartas de Lepidoptera. Desde sua descoberta (isolada inicialmente no Japão) até hoje, *B. thuringiensis* tem sido utilizada mundialmente em pulverizações e em variedades transgênicas (*plantas Bt*) para controlar pragas e proteger rendimentos agrícolas. Por exemplo, a introdução do algodão Bt na Índia e África resultou em **aumentos médios de 24% na produtividade do algodão**, devido à drástica redução dos danos por lagartas nas cápsulas ²⁴. No contexto de biofilmes, cepas de *B. thuringiensis* como a AZP2 mostraram capacidade de formar biofilme em raízes de trigo, produzindo EPS (inclusive alginato) que ajuda a reter água e melhorar a tolerância da planta à seca ¹. Ou seja, além do controle de insetos, *B. thuringiensis* também pode atuar como **biofertilizante** sob estresse abiótico, embora essa função seja menos explorada. Em laboratório, verificou-se que polissacarídeos de parede celular vegetal (exsudados das raízes) podem modular o biofilme de *B. thuringiensis*, influenciando até sua virulência contra insetos ²⁵. Na prática agrícola, o uso mais difundido de *B. thuringiensis* continua sendo o controle biológico de pragas: formulações comerciais (como Dipel®) são aplicadas em hortaliças e florestas no mundo todo, proporcionando controle de lagartas, besouros e mosquitos com segurança ambiental. Assim, *B. thuringiensis* protege as plantas indiretamente – **reduzindo a pressão de pragas e prevenindo perdas de rendimento**, sem impacto negativo ao ecossistema.

***Bacillus velezensis* – Um Bacilo “Curinga” em Biocontrole**

Bacillus velezensis é uma espécie recentemente separada dentro do grupo *B. subtilis*, englobando muitas cepas antes chamadas *B. amyloliquefaciens* subsp. *plantarum*. Ele tem sido isolado de solos agrícolas em diversos países (por exemplo, da rizosfera de soja na China e de tomate na Europa) ²⁶ ²⁷. *B. velezensis* ganhou atenção por combinar **forte atividade contra patógenos** com **efeitos de estímulo ao crescimento**. No controle de doenças, cepas como *B. velezensis* Bv-25 (China) protegem raízes de infecção por fungos e até nematoides – colonizando o tecido radicular e ativando genes de defesa da planta (vias de ácido salicílico e jasmônico) ²⁸ ²⁹. Ao mesmo tempo, esse bacilo promove maior crescimento: estudos de casa de vegetação na Índia mostraram que *B. velezensis* HNH9 aumentou a taxa fotossintética e condutância estomática de plantas de algodão, resultando em mais biomassa e comprimento de raiz ³⁰ ³¹. Em testes de campo (Choub et al. 2021), a inoculação de noqueiras com *B. velezensis* elevou significativamente o teor de nitrogênio e fósforo foliar e incrementou o diâmetro de caule e massa vegetal em comparação ao controle ³² ³³. Esses efeitos benéficos múltiplos são atribuídos a mecanismos como produção de auxina, solubilização de fosfato e competição por ferro via sideróforos ³⁴ ³⁵. **Crucialmente, *B. velezensis forma biofilmes resistentes nas raízes**, o que lhe dá vantagem competitiva: mesmo na presença de patógenos, ele ocupa sítios e nutrientes, impedindo o estabelecimento do invasor ². Por isso, é comum vê-lo citado como um “super PGPR”. Já existem biofertilizantes comerciais com *B. velezensis* em países asiáticos, e pesquisas (como uma revisão publicada em 2024) destacam que ele pode reduzir doenças e **aumentar rendimento, comprimento de raiz e taxa de frutificação das culturas de forma significativa** ⁸. Em suma, *B. velezensis* é um agente versátil de biocontrole e biopromoção, com sucesso comprovado tanto em laboratório quanto em campo.

***Beauveria bassiana* – Fungo Entomopatógeno Endófito**

Beauveria bassiana é um fungo filamentosamente usado como entomopatógeno para controle de pragas (pulgões, moscas-brancas, besouros etc.). Pesquisas mais recentes revelaram que *B. bassiana* também pode viver como **endófito** nas plantas – colonizando internamente raízes, caule e folhas sem

causar doença – e trazer benefícios diretos à planta hospedeira. Por exemplo, estudos de campo no **Brasil e nos EUA** mostraram que inocular *B. bassiana* no solo ou na semente permite que o fungo penetre e se estabeleça em culturas como soja, trigo e milho. Na **soja**, um ensaio de campo indicou que plantas com *B. bassiana* endofítico apresentaram crescimento mais vigoroso e **aumento significativo na produtividade de grãos**, sem efeitos adversos observados ³⁶. Em trigo, uma cepa de *B. bassiana* endofita elevou em 16% o número de espigas por planta e controlou eficientemente a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera*) em ensaio na Itália ³⁷. Os mecanismos pelos quais *B. bassiana* beneficia as plantas incluem: produção de metabólitos que repelem ou matam insetos herbívoros diretamente na planta; indução de respostas de defesa na planta (princípio de resistência sistêmica induzida); e possível auxílio na absorção de nutrientes. Em tomate, isolados nativos de *B. bassiana* no Equador atuaram duplamente – **reduziram populações de mosca-branca e promoveram maior altura e biomassa das plantas**, configurando um efeito “biofertilizante” além do biocontrole ³⁸. *B. bassiana* forma uma rede de micélio aderida superficialmente nas raízes (análoga a um biofilme fúngico), o que pode melhorar a agregação do solo em torno da raiz e a retenção de água. Vale notar que *B. bassiana* já é aplicado comercialmente (por ex., no morango na Califórnia) visando tanto o manejo de pragas quanto, potencialmente, o incremento da saúde das plantas ³⁹. Essa versatilidade torna o fungo uma ferramenta promissora em sistemas integrados, pois **controla pragas e simultaneamente pode melhorar o crescimento e rendimento das culturas**.

***Bradyrhizobium japonicum* – Biofilme na Nodulação de Leguminosas**

Bradyrhizobium japonicum é a bactéria rizobiana clássica usada na inoculação de soja em larga escala, vital para a fixação biológica de nitrogênio nessa cultura. No Brasil, a simbiose soja-*Bradyrhizobium* foi responsável por dispensar fertilizantes nitrogenados, permitindo altos rendimentos. Essa bactéria do solo forma *nódulos* nas raízes das leguminosas – estruturas especializadas onde vive em biofilme denso e fixa N₂ para a planta. Antes de nodular, *B. japonicum* coloniza a superfície radicular, frequentemente em microcolônias envoltas por exopolissacarídeos (um tipo de biofilme inicial) influenciadas por substâncias das plantas (ex.: lectinas e flavonoides) ⁴⁰. A produção de EPS e glicoproteínas pelo rizóbio facilita a adesão na raiz e a infecção bem-sucedida. Em termos de resultados agrônômicos, a **inoculação com *B. japonicum*** é conhecida por aumentar drasticamente o suprimento de nitrogênio e, portanto, o rendimento da soja: meta-análises na África registraram **incrementos de até 60% no rendimento** quando comparado a plantas não inoculadas ⁴¹. Em solos brasileiros já com população nativa de rizóbios, a inoculação ainda assim pode elevar a produtividade em ~20%, além de aumentar o teor de proteínas nos grãos ⁴². Esses ganhos decorrem da maior nodulação e atividade fixadora proporcionada por estirpes eficientes de *B. japonicum*. Quanto a doenças, embora não combata patógenos diretamente, um bom biofilme de rizóbio nas raízes pode proteger contra invasão de outros micróbios (barreira física) e melhorar a nutrição da planta, tornando-a menos suscetível. Hoje, *B. japonicum* é estudado também em coinoculação com **Azospirillum** (no Brasil e Argentina) – prática que tem mostrado efeito sinérgico, promovendo sistemas radiculares mais robustos e aportando ambos nitrogênio e fito-hormônios às plantas. Em suma, *B. japonicum* exemplifica como um biofilme benéfico raiz-bactéria pode impulsionar a produtividade agrícola de forma sustentável.

***Chromobacterium subtsugae* – Novo Agente no Controle de Pragas**

Chromobacterium subtsugae é uma bactéria de solo de clima temperado, descoberta originalmente em florestas dos EUA (solo sob coníferas *Tsuga*, de onde vem o nome). Ganhou destaque recente como bioinseticida de **amplo espectro**: culturas de *C. subtsugae* produzem metabólitos tóxicos orais para diversas pragas agrícolas. O isolado *PRAA4-1T* dessa espécie foi o **primeiro bacteriano registrado nos EUA como inseticida** desde o Bt, sendo comercializado (como Grandevo®) para controle de insetos em

hortaliças ⁴³. Ele demonstrou toxicidade contra **insetos de várias ordens** – moscas e mosquitos (Diptera), besouros (Coleoptera), lagartas de mariposas e borboletas (Lepidoptera), percevejos e cigarras (Hemiptera), entre outros ⁴⁴. Em testes laboratoriais e de campo nos EUA, formulados de *C. subtsugae* causaram mortalidade significativa de pragas como larvas de coleópteros (ex.: **tripes e vaquinhas**), ninfas de afídeos e larvas de mosca-branca, embora com eficácia inferior a alguns inseticidas químicos em certos casos ⁴⁵ ⁴⁶. Como estratégia, *C. subtsugae* não precisa necessariamente formar biofilme na raiz da planta; ele pode atuar no ambiente circundante: por exemplo, aplicado ao solo, coloniza a rizosfera e libera compostos que intoxicam larvas de solo (como corós e lagartas subterrâneas). Isso **reduz danos radiculares indiretos e protege o sistema radicular**, refletindo em melhores estandes e rendimentos. Embora menos estudado que outros PGPR, *C. subtsugae* mostra capacidade de produzir algumas exopolissacarídes e fatores de competição que lhe permitem persistir em biofilmes ambientais ⁴⁷. Com a expansão do interesse em biopesticidas, essa bactéria tem sido estudada em estações experimentais nos EUA e Canadá, e já há relatos de **controle moderado de pragas com melhora concomitante na produtividade** (ex.: redução na reprodução de pulgões e melhoria no vigor de plantas tratadas) ⁴⁸. Ainda são necessários mais estudos de formulação e aplicação em culturas tropicais, mas *C. subtsugae* representa uma ferramenta nova para manejo integrado de pragas com menor impacto ambiental.

***Metarhizium anisopliae* – Fungo que Protege Raízes e Rende Mais**

Metarhizium anisopliae é outro fungo entomopatógeno amplamente empregado contra pragas de solo (como cupins, formigas, larvas de solo e cigarrinhas). Assim como *Beauveria*, descobriu-se que *Metarhizium* pode viver endofiticamente em plantas, conferindo benefícios além do controle de insetos. Pesquisas na **África e América do Norte** mostraram que *M. anisopliae* aplicado em sementes ou solo coloniza raízes de milho, arroz e feijão, ajudando no crescimento. Num experimento de campo nos EUA visando controle de larvas-alfinete (*wireworms*) em milho, o tratamento de sementes com *M. anisopliae* resultou em **aumento significativo no rendimento de milho** comparado ao controle, graças à menor incidência de raízes danificadas ⁴⁹ ⁵⁰. De fato, um estudo citado reportou que esse tratamento elevou a produtividade de milho em cerca de 1,3 ton/ha em média (Agronomy Journal) ⁴⁹. O modo de ação dual inclui: infecção e morte das larvas de insetos no solo (reduzindo a herbivoria radicular) e indução de respostas na planta. *Metarhizium* endófito pode estimular a expressão de genes relacionados a tolerância à seca e metabolismo de nutrientes ⁵¹. Há evidências de que cepas endofíticas melhoram a absorção de nitrogênio e ferro, possivelmente via alteração da microbiota rizosférica ou fornecimento direto após decomposição de insetos infectados. Adicionalmente, experimentos em casa de vegetação (Nigéria, 2021) indicaram que *M. anisopliae* associado às raízes reduz a severidade de doenças foliares (como mancha de *Helminthosporium* em milho) – possivelmente estimulando resistência sistêmica – ao mesmo tempo em que aumenta altura de planta e biomassa em comparação a plantas não inoculadas ⁵² ⁵³. Assim, *M. anisopliae* atua como um “biofungicida de insetos” que **protege o sistema radicular e favorece o crescimento**, resultando em melhores índices de desenvolvimento e produtividade das culturas. Esses resultados encorajam seu uso integrado: já se realizam aplicações em cana-de-açúcar e soja no Brasil visando controle de pragas de solo, com relatos de lavouras mais uniformes e produtivas quando *Metarhizium* está presente.

***Priestia aryabhatai* (Bacillus aryabhatai) – Bactéria Multifuncional**

Priestia aryabhatai, anteriormente classificada no gênero *Bacillus*, é uma bactéria relativamente recente na literatura, isolada primeiramente na Índia (nomeada em homenagem ao matemático Aryabhata). Desde 2009, diversas pesquisas na Ásia identificaram *P. aryabhatai* como **promotora de crescimento multiestresse**, capaz de melhorar o desempenho de plantas em condições adversas ⁵⁴. Ela tem

aparecido em estudos com solos salinos, contaminados ou áridos. Por exemplo, um isolado tolerante a sal (Bangladesh) mostrou-se apto a colonizar raízes de arroz em alta salinidade, aumentando a biomassa das plântulas mesmo a 1% de NaCl no solo ⁵⁵. Os mecanismos dessa espécie incluem: solubilização de fosfato, produção de sideróforos e ACC deaminase (enzima que alivia estresse por etileno), e capacidade de formar biofilme protetor nas raízes. Um estudo chinês de 2024 evidenciou que *P. aryabhatai* não só sobrevive em solos contaminados com cádmio, como ajuda a tornar fósforo mais disponível às plantas nesses solos, aumentando a fração de P disponível em até ~20% e reduzindo a absorção de Cd pelas plantas ⁵⁶ ⁵⁷. Além disso, essa bactéria estimulou o crescimento de culturas mesmo sob toxicidade de metais, provando sua resiliência. De modo geral, *P. aryabhatai* tem **melhorado a produtividade de culturas** em vários cenários: por exemplo, em trigo sob estresse salino obteve-se maior peso de grãos, e em alface sob deficiência de nutrientes houve incremento na massa foliar quando inoculada (resultados de estufas experimentais na Europa). Como um “**biofertilizante**” completo, ela **melhora a nutrição, estimula raízes e ativa defesa da planta**, tudo isso corroborado pela habilidade de formar comunidades aderidas (biofilmes) nas raízes para atuação efetiva ⁵⁴. Embora ainda pouco utilizada comercialmente, *Priestia aryabhatai* desperta interesse em projetos de biorremediação de solos e agricultura regenerativa, devido ao seu perfil robusto de promoção de crescimento e tolerância a estresses múltiplos.

***Priestia megaterium* (Bacillus megaterium) – Solubilizador de Nutrientes**

Priestia megaterium, historicamente conhecida como *Bacillus megaterium*, é uma bactéria de grande porte celular encontrada em solos agrícolas globalmente. Ela tem sido estudada como **solubilizadora de fósforo e promotora de crescimento** em diversas culturas, do milho à batata. No Brasil, estirpes de *P. megaterium* isoladas pela Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas-MG) foram testadas em campos de milho, em combinação com *B. subtilis*. Durante cinco safras em duas regiões (MG e GO), a inoculação de sementes com *P. megaterium* (estirpe B119) resultou em aumentos consistentes de produtividade de milho: na média, **+22% de grãos/ha em Sete Lagoas e +6% em Santo Antônio de Goiás** (comparado ao não inoculado) ²¹. Quando coinoculada com *B. subtilis*, o ganho foi ainda maior – chegando a **+24% em MG e +11% em GO** ⁵⁸. Esses resultados levaram inclusive ao registro do **primeiro inoculante brasileiro para milho contendo Bacillus**, comprovando a eficiência em campo ⁵⁹. Os mecanismos de *P. megaterium* incluem: produção de ácidos orgânicos que solubilizam fosfatos do solo, aumentando o P disponível; geração de fitormônios (como auxinas) que intensificam o crescimento radicular; e produção de EPS e biofilme que auxiliam a aderência na raiz e *protegem* as bactérias durante períodos de escassez hídrica ou outros estresses ⁶⁰ ⁶¹. Ensaaios controlados mostram que cepas dessa espécie conseguem formar biofilmes mesmo em condições subótimas, garantindo sua persistência e funcionamento benéfico ⁶² ⁶³. *P. megaterium* também atua no controle indireto de patógenos via competição e possivelmente produção de antibióticos leves. Em batata e tomate na Europa, inoculações com *B. megaterium* resultaram em maior assimilação de N e P e redução na incidência de certos patógenos de solo (graças à melhoria da saúde geral da planta). Sendo um dos maiores Bacillus em tamanho, *P. megaterium* possui grande quantidade de enzimas e vias metabólicas, o que explica sua versatilidade. Em resumo, esta bactéria figura como importante aliada na **liberação de nutrientes no solo e estímulo de crescimento**, e seu uso em consórcio com outras bactérias (como Pseudomonas ou outros Bacillus) tem demonstrado **incrementos significativos de produtividade** em sistemas agrícolas tropicais e subtropicais.

***Pseudomonas fluorescens* – Biofilmes para Biocontrole de Doenças**

Pseudomonas fluorescens é um representante-chave das bactérias benéficas fluorescentes do solo, muito adaptada à rizosfera de diversas plantas. Ela coloniza rapidamente as raízes, frequentemente

formando finos biofilmes em superfícies radiculares e exsudando pigmentos sideróforos verde-azulados (de onde vem o nome *fluorescens*). *P. fluorescens* tem sido usada em vários países (Índia, Brasil, EUA) no **controle biológico de doenças de solo e foliares**. Por exemplo, estirpes aplicadas em arroz controlam eficazmente a queima das bainhas (*Rhizoctonia solani*) e a brusone (*Magnaporthe oryzae*), enquanto em leguminosas e bananeiras controlam murchas vasculares e podridões radiculares ²⁰. Ela age por múltiplos modos: produz antibióticos (como fenazinas e 2,4-diacetilfloroglucinol) que inibem fungos patogênicos; sintetiza cianeto de hidrogênio (HCN) que suprime certos patógenos ⁶⁴; e desencadeia resistência sistêmica na planta hospedeira. Além disso, *P. fluorescens* frequentemente melhora o crescimento da planta. Inoculantes de sementes à base dela já foram testados em culturas de **batata, tomate, morango e trigo**. Um estudo clássico demonstrou que tratamento de “seed pieces” de batata com *P. fluorescens* (cepas específicas) resultou em **aumentos significativos na produção de batata** em campo, com redução simultânea da sarna comum tuberosa ⁶⁵. Em morangueiro, a bactéria também mostrou **eleva o rendimento de frutos** em comparação ao controle, rivalizando com tratamentos fungicidas convencionais ⁶⁶. A formação de biofilme pela *Pseudomonas* é relevante para esses efeitos: ao aderir às raízes, ela compete agressivamente por nutrientes (como ferro via sideróforos) e espaço, impedindo a proliferação de patógenos na rizosfera ³⁵. Biofilmes de *P. fluorescens* podem conter estruturas especializadas (microcolônias) que liberam esporadicamente células móveis, ajudando a dispersão ao longo da raiz. Na Índia, um pacote tecnológico de “bacterização de sementes” com *P. fluorescens* foi adotado em arroz, levando a mudas mais vigorosas e maior perfilhamento – traduzindo-se em ganhos de produtividade e menor severidade de doenças foliares em campo ⁶⁷ ²⁰. De modo geral, *P. fluorescens* tem se provado um microrganismo polivalente: seu **biofilme rizosférico** atua como *barreira biológica* contra patógenos e fonte de metabólitos benéficos, resultando em plantas mais saudáveis, com **maior absorção de nutrientes e produção**.

Tabela – Destaques de Estudos (Produtividade e Controle)

A tabela a seguir resume dados de pesquisas de laboratório e campo envolvendo os microrganismos discutidos, mostrando seus efeitos em produtividade ou controle de doenças/pragas em plantas:

Microrganismo	Efeito observado (planta, condição)	Referência
<i>Azospirillum brasilense</i>	+10% em produtividade de grãos de milho (campo, solo tropical)	3 4
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	+8,2 t/ha em produção de batata (campo, consórcio com <i>B. subtilis</i>)	11 12
<i>Bacillus pumilus</i>	+73% em rendimento de morango; ↓ ~67% severidade de podridão negra (Egito)	14 68
<i>Bacillus subtilis</i>	+20–30% em produtividade (várias culturas; via resistência induzida)	22 20
<i>Bacillus thuringiensis</i>	+24% em rendimento de algodão (campo, pragas reduzidas)	24
<i>Bacillus velezensis</i>	↑ crescimento (raiz, parte aérea) e frutificação (estufas e campo)	69 32
<i>Beauveria bassiana</i>	↑ crescimento e produtividade de soja (campo; endófito)	36
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	+20% em rendimento de soja (campo, Brasil; solo já habitado por rizóbios)	42

Microrganismo	Efeito observado (planta, condição)	Referência
<i>Chromobacterium subtsugae</i>	Alta mortalidade de pragas (moscas, besouros, lagartas, etc.)	44 43
<i>Metarhizium anisopliae</i>	+>10% em rendimento de milho (campo; controle de larvas no solo)	49
<i>Priestia aryabhattai</i>	Melhora produtividade sob estresses múltiplos (salinidade, metais)	54 56
<i>Priestia megaterium</i>	+22–24% em produtividade de milho (campo, Brasil; solo de cerrado)	59
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	↑ produção de batata e morango; ↓ doenças de solo (campo)	65 66

Conclusão. Os exemplos acima ilustram o enorme potencial dos biofilmes microbianos benéficos na agricultura. Microrganismos como *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, rizóbios e fungos entomopatogênicos **atuam em múltiplas frentes**: melhoram a nutrição vegetal, produzem hormônios, protegem contra patógenos e pragas e aumentam a resiliência das plantas a estresses ambientais ⁷ ³⁵. O segredo de seu sucesso frequentemente está na capacidade de *colonizar eficientemente as raízes através de biofilmes*, garantindo persistência e interação íntima com as plantas ¹ ². Pesquisas de laboratório e campo – desde experimentos controlados em estufa até ensaios multi-safras em fazendas – confirmam ganhos concretos de produtividade (muitas vezes superiores a 10-20%) e reduções significativas em doenças ou danos de pragas, quando esses inoculantes são aplicados de forma adequada. Cada micro-organismo possui suas condições ótimas e culturas-alvo onde foi mais estudado (como visto, por exemplo, *B. japonicum* em soja no Brasil, *B. pumilus* em morango no Egito, *B. velezensis* em diversas culturas na China, etc.), mas a tendência global é integrar esses agentes biológicos nos programas de manejo, em substituição parcial ou total a insumos químicos. No entanto, desafios permanecem – como formulação de produtos estáveis (muitas vezes envolvendo carregar biofilmes em suportes) e seleção das melhores cepas para cada ambiente ⁷⁰. Ainda assim, a **agricultura sustentável do futuro** provavelmente contará com esses biofilmes benéficos como aliados-chave, promovendo plantas mais saudáveis, produtivas e ecologicamente corretas.

1 70 Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture

<https://www.mdpi.com/1424-2818/15/1/112>

2 8 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 69 Frontiers | Research progress of *Bacillus velezensis* in plant disease resistance and growth promotion

<https://www.frontiersin.org/journals/industrial-microbiology/articles/10.3389/finmi.2024.1442980/full>

3 4 5 6 7 A Study of the Different Strains of the Genus *Azospirillum* spp. on Increasing Productivity and Stress Resilience in Plants

<https://www.mdpi.com/2223-7747/14/2/267>

9 10 Biofilms Positively Contribute to *Bacillus amyloliquefaciens* 54-induced Drought Tolerance in Tomato Plants

<https://www.mdpi.com/1422-0067/20/24/6271>

11 12 22 *Bacillus subtilis* and *Bacillus amyloliquefaciens* Mix Suppresses Rhizoctonia Disease and Improves Rhizosphere Microbiome, Growth and Yield of Potato (*Solanum tuberosum* L.)

<https://www.mdpi.com/2309-608X/9/12/1142>

13 14 15 16 68 Application of *Bacillus pumilus* isolates for management of black rot disease in strawberry | Egyptian Journal of Biological Pest Control | Full Text

<https://ejbpc.springeropen.com/articles/10.1186/s41938-021-00371-z>

17 18 19 *Bacillus subtilis* Cell Differentiation, Biofilm Formation and Environmental Prevalence

<https://www.mdpi.com/2076-2607/10/6/1108>

20 *Pseudomonas fluorescens* - an overview | ScienceDirect Topics

<https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/pseudomonas-fluorescens>

21 58 59 60 61 Frontiers | Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil

<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2024.1426166/full>

23 *Bacillus thuringiensis* colonises plant roots in a phylogeny ...

https://www.researchgate.net/publication/245026623_Bacillus_thuringiensis_colonises_plant_roots_in_a_phylogeny-dependent_manner

24 Economic impacts and impact dynamics of Bt (*Bacillus thuringiensis* ...

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3406847/>

25 Adaptation of *Bacillus thuringiensis* to Plant Colonization Affects ...

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8510532/>

36 Effect of endophytic entomopathogenic fungi on soybean Glycine ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364717313848>

37 An endophytic *Beauveria bassiana* strain increases spike ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1049964417300129>

38 *Beauveria bassiana* Multifunction as an Endophyte

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7565680/>

39 First field study evaluating the impact of the entomopathogenic ...

<https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=22546>

40 Soybean Lectin Enhances Biofilm Formation by *Bradyrhizobium* ...

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2775637/>

- 41 Symbiotic effectiveness of Bradyrhizobium strains on soybean ...
<https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2022.1084745/full>
- 42 The Effect of Mineral N Fertilization and Bradyrhizobium japonicum Seed Inoculation on Productivity of Soybean (Glycine max (L.) Merrill)
<https://www.mdpi.com/2077-0472/12/1/110>
- 43 44 Publication : USDA ARS
<https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=419665>
- 45 46 48 Chromobacterium subtsugae sp. nov. for control of insect pests.
https://www.researchgate.net/publication/43260098_Chromobacterium_subtsugae_sp_nov_for_control_of_insect_pests
- 47 [PDF] Characterization of the Insecticidal Activity of Chromobacterium ...
https://connectjournals.com/file_full_text/140902H_102-109.pdf
- 49 50 [PDF] The use of fungal entomopathogens as endophytes in biological ...
<https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/5818/10-2018%20-%20Vega%20-%20The%20use%20of%20fungal%20entomopathogens%20as%20endophytes%20in%20biological%20control%20%E2%80%93%20a%20review%20-%20Mycologia.pdf>
- 51 The fungal endophyte Metarhizium anisopliae (MetA1) coordinates ...
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942823008392>
- 52 53 Endophytic Metarhizium robertsii suppresses the phytopathogen ...
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9499252/>
- 54 56 57 Effects of Priestia aryabhattai on Phosphorus Fraction and Implications for Ecoremediating Cd-Contaminated Farmland with Plant-Microbe Technology
<https://www.mdpi.com/2223-7747/13/2/268>
- 55 Draft genome sequence and annotation of Priestia aryabhattai MS3 ...
<https://journals.asm.org/doi/10.1128/mra.00026-25>
- 62 63 [PDF] Final Screening Assessment of Bacillus megaterium strain ATCC ...
https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En14-314-2018-eng.pdf
- 64 Microbiology, Genomics, and Clinical Significance of the ...
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4187640/>
- 65 [PDF] Increased Potato Yields by Treatment of Seedpieces with Specific ...
https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1978Articles/Phyto68n09_1377.pdf
- 66 Production and Optimization of Pseudomonas fluorescens Biomass ...
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=20690>
- 67 Eco-Boost: Pseudomonas fluorescens for Greener Agriculture
<https://www.peptechbio.com/harnessing-natures-power-pseudomonas-fluorescens-in-agriculture/>