

---

## Biodegradação e biorremediação de pesticidas: sistemas de resposta bacterianos frente a exposição por pesticidas

Paola Pereira Constantin, Loraya Yaskara Antonechen Gonçalves

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-03-9.c5>

### Resumo

Pesticidas são compostos químicos amplamente utilizados na agricultura a fim de inibir o crescimento e a sobrevivência de espécies indesejadas no campo. Entretanto, estes xenobióticos prejudicam não só os seus organismos alvos, como também outros organismos que acabam entrando em contato com o produto químico, estes organismos são chamados de não-alvos. As bactérias estão presentes em quase todos os ambientes e sofrem demasiadamente com a contaminação por pesticidas, principalmente no solo e na água. Na tentativa de diminuir os danos causados por esta contaminação, estes microrganismos apresentam alguns sistemas de respostas que incluem a produção de enzimas, o desenvolvimento da tolerância, a degradação e a formação do biofilme e sua comunicação por *quorum sensing*. Esta revisão teve como objetivo descrever alguns destes sistemas de resposta bacterianos, a fim de destacar o potencial biotecnológico das bactérias na biorremediação de pesticidas do meio ambiente. Os resultados apresentaram a vantagem da exploração dos consórcios bacterianos organizados em biofilmes e a comunicação célula-célula por via da sinalização química de quorum sensing, no processo de biorremediação. Muitos estudos ainda devem ser realizados para que futuramente possam ser formulados produtos biotecnológicos de interesse ambiental.

**Palavras-chave:** Sistemas de resposta, Biorremediação, Biofilme, Consórcios bacterianos, *Quorum sensing*.

### Abstract

Pesticides are chemical compounds widely used in agriculture to inhibit growth and survival of unwanted species in the field. However, these xenobiotics harm not only their target organisms, but also other organisms that end up coming into contact with the chemical. The latter organisms are called non-targets. Bacteria are present in almost all environments and suffer greatly from pesticide contamination, especially in soil and water. In an attempt to reduce the damage caused by this contamination, these microorganisms present response systems that include the production of enzymes, the development of tolerance, the degradation and formation of biofilm and communication by quorum sensing. This review aimed at describing some of these bacterial response systems to highlight the biotechnological potential of bacteria in the bioremediation of environmental pesticides. The results evidenced the advantage of exploring bacterial consortia organized in biofilms and cell-to-cell communication via chemical quorum sensing signaling in the bioremediation process. Many studies still need to be carried out so that biotechnological products of environmental interest can be formulated in the future.

**Key words:** Response systems, Bioremediation, Biofilm, Bacterial consortia, Quorum sensing.

## 1. Introdução

Pesticidas são substâncias químicas amplamente utilizadas na agricultura a fim de repelir ou matar espécies indesejadas que possam levar a perda de produtividade ou qualidade das plantações (RICHARDSON et al. 2019).

A utilização destes pesticidas pode ser justificada pela alta demanda de produção de alimentos em todo o mundo, visto que, segundo dados da Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), a prevalência de desnutrição aumentou de 8,4% para 9,9% entre os anos de 2019 e 2020, com a estimativa de que 720 a 811 milhões de pessoas passaram fome no ano de 2020, sendo que mais da metade desta população vive em regiões da África e da Ásia.

Estes pesticidas podem ser classificados de acordo com o seu organismo alvo, por exemplo: os herbicidas visam eliminar as plantas daninhas, os inseticidas os insetos presentes nas plantações, os fungicidas buscam controlar os fungos e os rodenticidas, os roedores (RICHARDSON et al., 2019). E podem atuar de diversas maneiras, de acordo com o seu alvo principal, podendo bloquear a síntese de aminoácidos, carotenoides e lipídeos, ou interromper o fluxo de elétrons no processo de fotossíntese, no caso dos herbicidas (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020).

Além disso, outros pesticidas podem atuar como inibidores de acetilcolinesterases, da ATP sintase mitocondrial, como bloqueadores dos canais de sódio dependentes de voltagem, bloqueadores do canal do receptor de acetilcolina nicotínico, entre outros (NAGAI, 2021). Entretanto, o causador de diversas preocupações é o fato de que, muitas vezes o alvo molecular dos pesticidas, são comuns entre os organismos alvos e não-alvo (RICHARDSON et al., 2019), desta maneira, os pesticidas podem ocasionar uma série de problemas ao meio ambiente, prejudicando a vida no solo, na água e no ar.

Além disso, os pesticidas podem também ocasionar diversos problemas para a saúde humana, principalmente aos trabalhadores rurais, os quais trabalham em contato direto com estes produtos. A contaminação destes trabalhadores ocorre principalmente pela falta de segurança nas aplicações e pelas dosagens utilizadas excessivamente (SOOKHTANLOU; ALLAHYARI; SURUJLAL, 2021). A população em geral também não está a salvo da contaminação por pesticidas, já que podem entrar em contato com resíduos presentes nos alimentos e na água, além de também estarem sujeitas a deriva

de aplicação em áreas próximas às lavouras (DAMALAS; KOUTROUBAS, 2016).

A contaminação por pesticidas pode ocorrer de três maneiras, em ordem de gravidade, pela ingestão; pela inalação e pela absorção da pele. Os efeitos desta intoxicação dependem principalmente da classificação de toxicidade dos pesticidas, mas podem variar de sintomas leves até sintomas graves, como convulsões, câncer e até mesmo morte (DAMALAS; KOUTROUBAS, 2016). Além disso, já se sabe que os pesticidas podem causar neurotoxicidade em mamíferos (RICHARDSON et al., 2019), além de efeitos citotóxicos e genotóxicos (BIANCHI et al., 2017).

Já nos microrganismos, os pesticidas podem levar à perda de funções ecológicas e perdas de diversidade, devido ao estresse oxidativo que causam (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020). Por este motivo, são necessários o desenvolvimento de estratégias de adaptação em meio à presença destes contaminantes (DOBRZANSKI et al., 2018). Os microrganismos, como as bactérias, podem apresentar diferentes respostas ao estresse por pesticidas, entre elas, a produção de enzimas antioxidantes, genes de degradação e principalmente a formação de biofilmes e comunicação por quorum sensing (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020).

Algumas técnicas são testadas e utilizadas para a degradação de resíduos de pesticidas presentes no meio ambiente e em superfícies vegetais, como o processo de oxidação avançado, o qual pode utilizar ondas de ultrassom, combinadas, ou não, com a adição de cloro livre (YANG; ZHOU; FENG, 2022); vácuo e ultravioleta (YANG; ZHANG, 2019). Além disso, pesquisas foram feitas a respeito de catalisadores com casca de arroz como fonte de celulose e ácidos hidroxâmicos para neutralizar os pesticidas (FERREIRA; TAKARADA; ORTH, 2021). Também foram estudadas a fotodegradação por dióxido de titânio (ANDRONIC; VLADESCU; ENESCA, 2021) e a adsorção por zeólitas (KASMI-BELOUZIR et al., 2021).

Visto que as bactérias produzem respostas para enfrentar a contaminação por pesticidas, este trabalho teve como objetivo compilar informações a respeito destes sistemas de resposta bacteriano, a fim de fornecer informações base para futuras pesquisas avançadas e aplicações biotecnológicas.

## 2. Metodologia

A busca de artigos científicos foi realizada através das plataformas de pesquisa PubMed, Science Direct e Web of Science, utilizando os termos de busca “pesticides contamination”, “pesticides degradation” “response system” “antioxidant system” “biofilm” “quorum sensing” e “microbial consortia”. Artigos dos últimos 5 anos; do período de 2017 a 2021; foram preferencialmente selecionados.

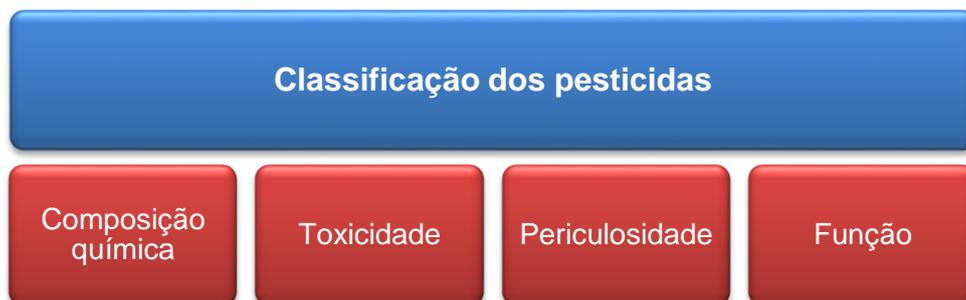
## 3. Desenvolvimento

### 3.1. Pesticidas: Definição e classificações

De acordo com a Lei Federal nº 7.802 de 11 de julho de 1989, artigo 2º, inciso I (BRASIL, 1989), são considerados pesticidas:

- a) os produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos;
- b) substâncias e produtos, empregados, como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento.

Estes, além da classificação funcional já citada, são também classificados de acordo com outras características, como o grupo químico, toxicidade e periculosidade ambiental (Figura 1).



**Figura 1.** Classificações dos pesticidas. Fonte: Autoras.

De acordo com a World Health Organization (WHO, 2019), a classificação toxicológica é importante para advertir sobre os riscos do uso dos pesticidas à saúde humana. Nessa classificação, os pesticidas podem ser divididos em 4 classes, de acordo com a dosagem letal 50% (DL<sub>50</sub>) (Tabela 1), ou seja, a dosagem mínima, em mg/Kg, para levar a óbito 50% dos animais de teste.

**Tabela 1.** Classificação dos pesticidas quanto ao nível de toxicidade.

CLASSE	CATEGORIA	ORAL (mg/Kg)	DÉRMICA (mg/Kg)
<b>Ia</b>	Extremamente tóxico	<5	<50
<b>Ib</b>	Altamente tóxico	5-50	50-200
<b>II</b>	Moderadamente tóxico	50-2000	200-2000
<b>III</b>	Pouco tóxico	>2000	>2000
<b>U</b>	Improvável que apresente risco agudo	>5000	>5000

Fonte: Autoras.

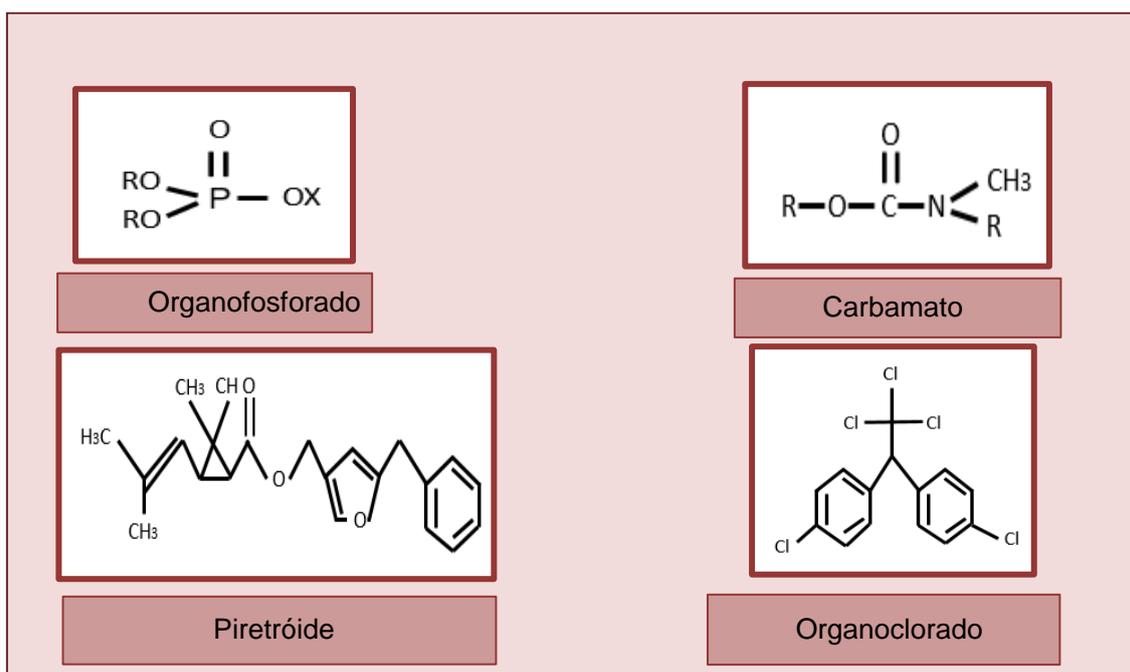
A classificação de periculosidade ambiental é atribuída ao Ministério do Meio Ambiente, de acordo com o decreto n° 4.074, artigo 7°, inciso II (BRASIL, 2002). Esta classificação divide os pesticidas em quatro categorias (Tabela 2) e deve estar baseada em diversas características, como a propriedade físico-químico, toxicidade, o potencial de bioacumulação, deslocamento e permanência no meio ambiente (IBAMA, 2010).

**Tabela 2.** Classificação dos pesticidas quanto ao nível de periculosidade.

CLASSE	COR DO RÓTULO	CATEGORIA
<b>I</b>	Vermelho	Altamente perigoso
<b>II</b>	Amarelo	Muito perigoso
<b>III</b>	Azul	Perigoso
<b>IV</b>	Verde	Pouco perigoso

Fonte: Autoras.

Os pesticidas podem ainda, ser classificados de acordo com a natureza química dos ingredientes ativos que os compõem, desta forma, são classificados em quatro grupos principais: organoclorados, que são formados por carbono, cloro e hidrogênio; organofosforados, os quais possuem um átomo de fósforo na sua estrutura principal; carbamatos, provenientes do ácido carbâmico (2NCOOH); e os piretróides, compostos por um ácido e um radical álcool com uma ligação éster (Figura 2) (NASCIMENTO; MELNYK, 2016).



**Figura 2.** As quatro classificações principais dos pesticidas quanto a composição química e suas estruturas químicas gerais. Fonte: Autoras.

### 3.2. Sistemas de respostas bacterianos

A utilização destes pesticidas pode levar à produção de espécies reativas ao oxigênio (EROs) devido ao estresse oxidativo ocasionado pela eletronegatividade das estruturas químicas que compõem os pesticidas (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020).

As EROs são capazes de reduzir oxigênio (O<sub>2</sub>) em superóxidos, que podem ser posteriormente reduzidos a peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) por peróxido dismutase; o O<sub>2</sub> pode ainda ser diretamente reduzido a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Como

consequência, as EROs podem interferir em vias bioquímicas (LEMIRE et al., 2017; PRIONE et al., 2016) e modificar sistemas estruturais, enzimáticos e celulares (DOBRZANSKI et al., 2018). Por esta razão, as bactérias detêm de estratégias para driblar estes danos, as quais podem ser sistemas de resposta enzimáticas e não enzimáticas (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020; LEMIRE et al., 2017).

Os sistemas de respostas enzimáticos incluem enzimas como a catalase (CAT), capaz de decompor o  $H_2O_2$  em água ( $H_2O$ ) e  $O_2$ ; superóxidos dismutase (SOD), que catalisa a dismutação do superóxido em  $H_2O_2$  e  $O_2$  (DOBRZANSKI et al., 2018; PRIONE et al., 2016), o ascorbato peroxidase (APX) e o guaiacol peroxidase (GPX) também foram relatados no controle de  $H_2O_2$  juntamente com a enzima CAT (ROVIDA et al., 2021). Outro sistema envolve a glutathione S-transferase (GST) que age na desintoxicação de diversos produtos tóxicos (ROVIDA et al., 2021).

Além disso, algumas alterações causadas pelos pesticidas podem levar ao mecanismo de tolerância/resistência a esses xenobióticos. E os genes responsáveis por esse mecanismo podem ser armazenados em plasmídeos ou transposons (SHAHID, KHAN, 2021). Outras respostas não específicas incluem a degradação e a formação de biofilme (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020).

### **3.3. Degradação dos pesticidas**

Alguns microrganismos presentes no solo, podem ainda utilizar os pesticidas como fonte de nutrientes para suas reações metabólicas, desta forma, após o consumo, estes pesticidas são convertidos pelos microrganismos em água, dióxido de carbono ou em outros metabólitos, que podem, ou não, ser mais prejudiciais para o meio ambiente (MAGNOLI et al., 2020), visto que alguns metabólitos formados podem ser mais difíceis de remover (ABRAHAM; SILAMBARASAN, 2016).

Biosurfactantes; metabólitos secundários produzidos por bactérias em fase estacionária; são também eficientes no processo de biodegradação de pesticidas, pois dissociam moléculas tóxicas, presentes no solo ou na água, e disponibilizam para os microrganismos, possivelmente através de interações eletrostáticas, ligação de contra-íons, troca iônica e precipitação-dissolução. São

exemplos de biosurfactantes os ramnolipídeos, trealolipídios e sofrorolipídios (RAJ; KUMAR; DAMES, 2021).

O processo de biodegradação pode ocorrer por diferentes rotas metabólicas, conta com a ação de diversas enzimas, como as hidrolases, peroxidases e oxigenases, e pode ocorrer em três etapas (Figura 3) (RAFFA; CHIAMPO, 2021).



**Figura 3.** As três etapas da biodegradação dos pesticidas. Fonte: Autoras.

Diversos estudos mostram a capacidade de degradação de pesticidas por diversas espécies bacterianas, como a bactéria *Pseudomonas* sp. cepa LAM1902, que mostrou degradar eficientemente o herbicida nicossulfuron, por um processo de hidrólise, principalmente pela quebra da ponte sulfonilureia, podendo ser atribuída ao acúmulo de oxalato (LI et al., 2020).

*Enterobacter aerogenes* CP2 e *Streptococcus pyogenes* CP11 foram capazes de remover cerca de 77% e 74% do pesticida clorpirifós, respectivamente, dentro de 30 horas de incubação, com atividade da hidrolase organofosforada (LOURTHURAJ; HATSHAN; HUSSEIN, 2021).

A degradação do pesticida pendimetalina foi testada por duas bactérias, a *Burkholderia* sp. e *Methylobacterium radiotolerans*, ambas as espécies se mostraram eficientes na degradação do pesticida, visto que o citocromo CYP450 de ambas possui afinidade com tal contaminante e são responsáveis por reações de oxidação em xenobióticos (SANTOS et al., 2021).

*Bacillus pumilus* TDJ-7 e *Bacillus subtilis* TDJ-9 degradaram com eficiência o pesticida terbutilazina, além disso, estas mesmas cepas foram capazes de degradar simazina, metribuzina, atrazina e ametrina (ZHU et al., 2022). Porém, os autores constataram que o consórcio bacteriano formado pelas cepas TDJ-7 e TDJ-9 foram ainda mais rápidas na degradação dos pesticidas. Isso demonstra que muitas vezes o consórcio bacteriano é mais eficiente na degradação quando em comparação com culturas isoladas, visto que na natureza as bactérias estão juntas e dependem uma das outras para sobreviver, e nos casos de degradação cada espécie pode produzir um metabólito diferente eficiente (RAFFA; CHIAMPO, 2021). Estes consórcios se organizam em biofilme e se comunicam por sinalização química de quorum sensing (PILEGGI; PILEGGI; SADOWSKY, 2020).

### **3.4. Biofilme e os consórcios bacterianos**

O biofilme é considerado uma estratégia adaptativa a situações de estresse, como a contaminação por pesticidas. As células bacterianas secretam uma matriz extracelular composta por substâncias poliméricas extracelulares (EPS), água, proteínas, lipídeos, compostos inorgânicos, RNA e DNA (KHWECK; AMER, 2018); que permitem que as células se fixem em um substrato ou umas às outras, formando uma comunidade com a capacidade de obter compostos orgânicos para a metabolização por enzimas extracelulares; além de serem capazes de coordenar a comunicação química de quorum sensing entre células, fazendo com que haja a troca de genes, alcançando assim, a estabilidade física (DECHO; GUTIÉRREZ, 2017).

Muitas vezes este biofilme pode ser composto por diversos grupos taxonômicos, como as algas, fungos, bactérias, archeas, protozoários e vírus. Os biofilmes possuem alta dinamicidade que os permitem se adaptar rapidamente as mudanças (POLST et al., 2018).

A formação do biofilme pelas bactérias passa por três fases distintas, são elas a fixação; a maturação e a liberação (Figura 4) (KHWECK; AMER, 2018).

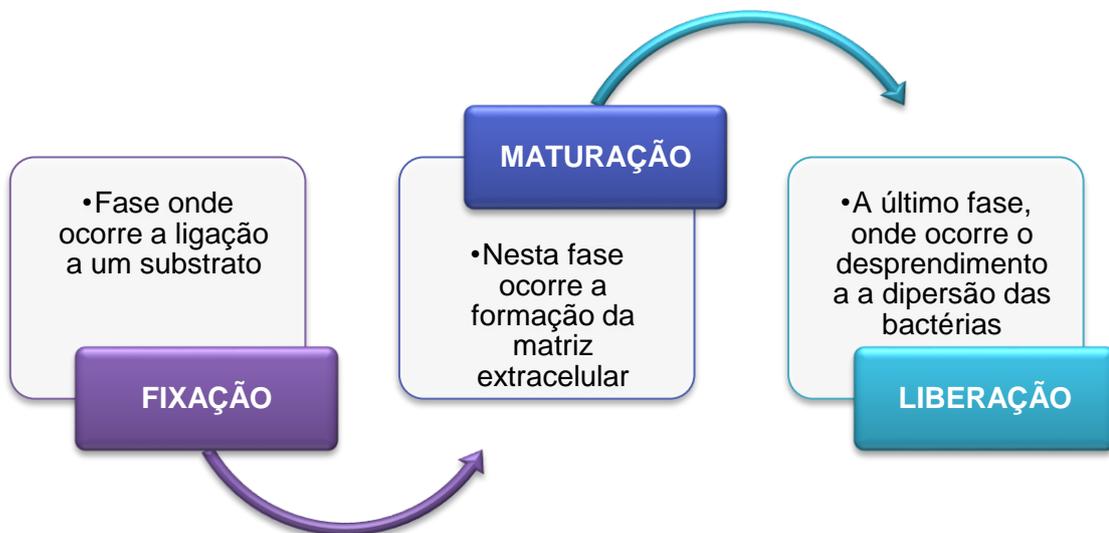
A utilização destes consórcios bacterianos apresenta algumas vantagens para a degradação dos pesticidas em relação ao uso de cepas isoladas, pois estes consórcios possuem características metabólicas complementares,

permitindo a divisão de trabalho e estabelecendo uma cooperação sintrófica que leva ao aumento da capacidade de degradação (ALEXANDRINO et al., 2021).

Já foram relatadas a capacidade de degradação dos fungicidas fluorados epoxiconazol e fludioxonil, por um consórcio bacteriano composto por *Pseudomonas*, *Ochrobactrum*, *Comamonas*, *Rhodobacter*, *Hydrogenophaga*, *Azospirillum*, *Methylobacillus*, *Acinetobacter* e *Pannonibacter* (ALEXANDRINO et al., 2020).

Consórcios formados por *Agrobacterium tumefaciens* cepa ECO1, *Cellulosimicrobium funkei* cepa ECO2, *Shinella zoogloeoides* cepa ECO3 e *Bacillus aryabhatai* cepa ECO4 se mostraram eficientes na degradação de clorpirifós, degradando 100% em 6 dias, mostrando mais rapidez do que as cepas isoladas. (UNIYAL; SHARMA; KONDAKAL, 2021).

Outro consórcio bacteriano composto por 21 espécies, dentre elas a mais abundante *Pseudomonas nitroreducens* foi eficiente da degradação de atrazina, carbofurano e glifosato em uma taxa de mais de 90% (GÓNGORA-ESCHEVERRÍA et al., 2020).



**Figura 4.** As três fases da formação do biofilme. Fonte: Autoras.

### 3.5. Quorum sensing

Como já exposto, os microrganismos, assim como as bactérias, podem apresentar diferentes respostas quando em contato com pesticidas,

principalmente em razão do estresse causado. Entre estes há que se destacar a formação de biofilmes e comunicação *quorum sensing*.

Portanto, numa definição menos complexa e sintetizada, tem-se por quorum sensing um sistema de comunicação intra e interespecies de microrganismos, baseado na emissão de estímulos e respostas dependentes da densidade populacional (SOLA et al, 2012).

Ainda de forma conceitual, *quorum sensing* pode ser definido como um mecanismo de comunicação entre bactérias, através da produção, liberação, acúmulo e detecção de pequenas moléculas químicas sinalizadoras, chamadas de auto indutores através de membranas bacterianas (MUKHERJEE; BASSLER, 2019). Este sistema de linguagem permite a coordenação do comportamento bacteriano em relação ao meio ambiente, regulando a expressão de genes especializados, em resposta à densidade populacional, além da intervenção em diversos processos fisiológicos como a diferenciação celular e fluxo de nutrientes, a bioluminescência, indução de fatores de virulência em patógenos de plantas e animais, biossíntese de antibióticos e a formação de biofilmes (SCHAUDER & BASSLER, 2001; RUMJANEK et al., 2004; AMMOR et al., 2008; BAI & RAI, 2011).

As bactérias gram-negativas utilizam pequenas moléculas como auto indutores, os receptores de auto indutores podem ser de dois tipos; fatores de transcrição citoplasmático ou sensores de histidina quinase. Já as bactérias gram-positivas utilizam oligopeptídeos como auto indutores e sensores de histidina quinase como receptores. Este complexo auto indutor-receptor formado é responsável por direcionar a expressão de genes alvo dependentes de quorum-sensing (MUKHERJEE; BASSLER, 2019).

Acredita-se também que este sistema de comunicação celular desempenhe funções importantes na ecologia microbiana de alimentos, tanto na deterioração destes produtos quanto na multiplicação de patógenos e produção de toxinas (SOLA et al, 2012).

A cepa CMA55 da bactéria *Pseudomonas fluorescens* foi capaz de apresentar um sistema de resposta frente aos herbicidas saflufenacil e glifosato. Esta cepa apresentou moléculas autoindutores que possivelmente estão relacionadas ao controle da produção de EROs. Além disso esta mesma cepa respondeu ao estresse causado pelos herbicidas formando biofilmes e ativando

enzimas antioxidantes sob a sinalização de moléculas de quorum sensing (FREITAS et al., 2021).

Assim, partindo do conceito de que consórcios bacterianos ou microbianos são microrganismos aquáticos e do solo, principalmente bactérias e fungos atuando em conjunto para a degradação de uma matéria, percebe-se que quando organizados em biofilmes e mantendo-se em comunicação Inter espécies pela sinalização química de quorum sensing é possível utilizá-los na biorremediação para o tratamento de contaminantes pelo uso de pesticidas.

#### 4. Conclusão

Ainda que o uso de pesticidas na agricultura se mostre de grande importância nos dias de hoje, não se pode negar o fato de que estes causam grandes prejuízos para os chamados organismos não-alvos.

As bactérias possuem seus próprios sistemas de respostas, a fim de tentar minimizar os danos causados por estes xenobióticos. Atualmente, tais sistemas estão sendo cada vez mais explorados pela ciência, visto que possuem um grande potencial biotecnológico na biodegradação e biorremediação dos pesticidas presentes na natureza.

O potencial das cepas bacterianas isoladas teve grande atenção por longos anos, porém, constatamos que os consórcios bacterianos formados por biofilmes e seu sistema de comunicação química de *quorum sensing* apresentam vantagens em relação aos isolados, e, portanto, necessitam de cada vez mais estudos, para que futuramente possam ser utilizados como produtos biotecnológicos eficientes para o meio ambiente.

#### 5. Referências

ABRAHAM, J.; SILAMBARASAN, S. Biodegradation of chlorpyrifos and its hydrolysis product 3,5,6-trichloro-2-pyridinol using a novel bacterium *Ochrobactrum* sp. JAS2: A proposal of its metabolic pathway. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 126, p. 13–21, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.07.001>

ABU KHWEK, A.; AMER, A. O. Factors mediating environmental biofilm formation by *Legionella pneumophila*. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, v. 8, n. 38, p. 1–10, 2018. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00038>

ALEXANDRINO, D. A. M. et al. Microbial degradation of two highly persistent fluorinated fungicides - epoxiconazole and fludioxonil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 394, n. March, p. 122545, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122545>

ALEXANDRINO, D. A. M. et al. Combining culture-dependent and independent approaches for the optimization of epoxiconazole and fludioxonil-degrading bacterial consortia. **Microorganisms**, v. 9, n. 10, 2021. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9102109>

AMMOR, M. S.; MICHAELIDIS, C.; NYCHAS, G. J. Insights into the role of quorum sensing in food spoilage. **Journal of Food Protection**, v. 71, n. 7, p. 1510-25, 2008. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-71.7.1510>

ANDRONIC, L.; VLADSCU, A. Synthesis , Characterisation , photocatalytic activity , and aquatic toxicity evaluation of TiO<sub>2</sub> nanoparticle. **Nanomaterials**, v. 11, n. 3197, p. 1–14, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11123197>

BAI, A. J.; RAI, V. R. Bacterial quorum sensing and food industry. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 10, n. 3, p. 183-193, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00150.x>

BIANCHI, E. et al. Monitoring the genotoxic and cytotoxic potential and the presence of pesticides and hydrocarbons in water of the Sinos River Basin, Southern Brazil. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 72, n. 3, p. 321–334, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0334-0>

BRASIL. Decreto nº 4.074, de Janeiro de 2002. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/d4074.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm) (Acesso em: 22 de dezembro de 2021).

BRASIL. Lei nº 7802, de 11 de Julho de 1989. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7802.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7802.htm) (Acesso em: 22 de dezembro de 2021).

DAMALAS, C. A.; KOUTROUBAS, S. D. Farmers' exposure to pesticides: Toxicity types and ways of prevention. **Toxics**, v.4, n.1, p.1-10, 2016. <https://doi.org/10.3390/toxics4010001>

DECHO, A. W.; GUTIERREZ, T. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, n. 922, p. 1–28, 2017. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00922>

DOBRZANSKI, T. et al. *Bacillus megaterium* strains derived from water and soil exhibit differential responses to the herbicide mesotrione. **PLOS ONE** 2018; 13(4): e.0196166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196166>  
FAO. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/211/en/> (Acesso: 07 de janeiro de 2022).

FERREIRA, J.G.L.; TAKARADA, W.H.; ORTH, E.S. Waste-derived biocatalysts

for pesticide degradation. **Journal of Hazardous Materials**, v. n. p., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127885>

FREITAS, P.N. et al. Specific quorum sensing molecules are possibly associated with responses to herbicide toxicity in a *Pseudomonas* strain. **Environmental Pollution**, v. 289, p.1-7, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117896>

GÓNGORA-ECHEVERRÍA, V. R. et al. Pesticide bioremediation in liquid media using a microbial consortium and bacteria-pure strains isolated from a biomixture used in agricultural areas. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 200, p. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110734>

IBAMA. **Produtos agrotóxicos e afins comercializados em 2009 no Brasil**. Brasília. 2010. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/livros/produtosagrotoxicoseafinscomercializadosem2009nobrasildigital.pdf> (Acesso em 22 de dezembro de 2021).

KASMI-BELOUZIR, T. et al. Effect of acid treated HY zeolites in adsorption of mesosulfuron-methyl. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 19, n. 2, p. 1435–1445, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00698-7>

LEMIRE, J. et al. Metabolic defence against oxidative stress: the road less travelled so far. **Journal of Applied Microbiology**, v. 123, n. 4, p. 798–809, 2017. <https://doi.org/10.1111/jam.13509>

LI, M. et al. Insight into the Characteristics and new mechanism of nicosulfuron biodegradation by a *Pseudomonas* sp. LAM1902. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 3, p. 826–837, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06897>

LOURTHURAJ, A. A.; HATSHAN, M. R.; HUESSIEN, D. Biocatalytic degradation of organophosphate pesticide from the wastewater and hydrolytic enzyme properties of consortium isolated from the pesticide contaminated water. **Environmental Research**, v. 205, p. 1-6, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112553>

MAGNOLI, K. et al. Herbicides based on 2,4-D: its behavior in agricultural environments and microbial biodegradation aspects. A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 31, p. 38501–38512, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10370-6>

MUKHERJEE, S.; BASSLER, B. L. Bacterial quorum sensing in complex and dynamically changing environments. **Nature Reviews Microbiology**, v. 17, n. 6, p. 371–382, 2019. <https://dx.doi.org/10.1038%2Fs41579-019-0186-5>

NAGAI, T. Ecological effect assessment by species sensitivity distribution for 38 pesticides with various modes of action. **Journal of Pesticide Science**, v. 46, n. 4, p. 366–372, 2021. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D21-034>

NASCIMENTO, L.; MELNYK, A. A química dos pesticidas no meio ambiente e na saúde The chemistry of pesticides in the environment and health. **Revista Mangaio Acadêmico**, v. 1, n. 1, p. 54–61, 2016. ISSN 2525-2801

PILEGGI, M.; PILEGGI, S. A. V.; SADOWSKY, M. J. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities. **Heliyon**, v. 6, n. 12, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05767>

POLST, B. H. et al. Hydrodynamics alter the tolerance of autotrophic biofilm communities toward herbicides. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. 2889, p. 1–12, 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02884>

PRIONE, L. P. et al. GST activity and membrane lipid saturation prevents mesotrione-induced cellular damage in *Pantoea ananatis*. **AMB Express**, v. 6, n. 70, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0240-x>

RAFFA, C. M.; CHIAMPO, F. Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review. **Bioengineering**, v. 8, n. 92, p. 1-29 2021. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092>

RAJ, A.; KUMAR, A.; DAMES, J. F. Tapping the role of microbial biosurfactants in pesticide remediation: an eco-friendly approach for environmental sustainability. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1-21, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.791723>

RICHARDSON, J. R. et al. Neurotoxicity of pesticides. **Acta Neuropathologica**, v. 138, n. 3, p. 343-362, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00401-019-02033-9>

ROVIDA, A. F. DA S. et al. Herbicides Tolerance in a Pseudomonas Strain Is Associated With Metabolic Plasticity of Antioxidative Enzymes Regardless of Selection. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673211>

RUMJANEK, N. G.; FONSECA, M. C. C. XAVIER, G. R. Quorum sensing em sistemas agrícolas. **Revista Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, ed. 33, 2004.

SANTOS, M. I. S. et al. Pendimethalin biodegradation by soil strains of *Burkholderia* sp. and *Methylobacterium radiotolerans*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. 1–9, 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120210924>

SCHAUDER, S.; BASSLER, B. L. The languages of bacteria. **Genes & development**, v.15, n. 12, p.1468-1480, jun. 2001. <http://www.genesdev.org/cgi/doi/10.1101/>  
SHAHID, M.; KHAN, M. S. Tolerance of pesticides and antibiotics among beneficial soil microbes recovered from contaminated rhizosphere of edible crops. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 3, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100091>

SOLA, M. C. et al. mecanismos de quorum sensing e sua relevância na microbiologia de alimentos. **Enciclopédia biosfera**, v.8, n. 14, p. 1419-1441, 2012. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3965>. (Acesso em: 10 de janeiro de 2022).

SOOKHTANLOU, M.; ALLAHYARI, M. S.; SURUJLAL, J. Health Risk of Potato Farmers Exposed to Overuse of Chemical Pesticides in Iran. **Safety and Health at Work**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2021.09.004>

UNIYAL, S.; SHARMA, R. K.; KONDAKAL, V. New insights into the biodegradation of chlorpyrifos by a novel bacterial consortium: Process optimization using general factorial experimental design. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 209, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111799>

WHO – World Health Organization. **The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019**. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240005662> (Acesso em: 23 de dezembro de 2021).

YANG, L.; ZHANG, Z. Degradation of six typical pesticides in water by VUV/UV/chlorine process: Evaluation of the synergistic effect. **Water Research**, v. 161, p. 439–447, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.021>

YANG, L.; ZHOU, J.; FENG, Y. Ultrasonics Sonochemistry Removal of pesticide residues from fresh vegetables by the coupled free chlorine / ultrasound process. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 82, p. 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105891>

ZHU, J. et al. Characteristics of two terbutylazine-degrading bacteria and the construction of a live bacterial agent for effective degradation of terbutylazine in soil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. 1, p. 1–10, 2022. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220200658>

## **Autores**

Paola Pereira Constantin, Loraya Yaskara Antonechen Gonçalves

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental. Universidade Estadual de Maringá. Emails: [paolaconstantin@gmail.com](mailto:paolaconstantin@gmail.com), [pg403634@uem.br](mailto:pg403634@uem.br), [lorayabento@gmail.com](mailto:lorayabento@gmail.com), [pg54931@uem.br](mailto:pg54931@uem.br)