

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 02/12/2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

BIOSSENSOR FOTOBIOELETROQUÍMICO BASEADO EM
***Synechococcus elongatus* PARA DETECÇÃO DE**
ATRAZINA EM ÁGUAS AMBIENTAIS

Maíza de Lima Bueno

Gestora Ambiental

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**BIOSSENSOR FOTOBIOELETROQUÍMICO BASEADO EM
Synechococcus elongatus PARA DETECÇÃO DE
ATRAZINA EM ÁGUAS AMBIENTAIS**

Discente: Maíza de Lima Bueno

Orientadora: Profa. Dra. Maísa Azevedo Beluomini

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para obtenção do título de
Mestre em Microbiologia Agropecuária.

B928b Bueno, Maíza de Lima
Biossensor fotobioeletroquímico baseado em *synechococcus*
elongatus para detecção de atrazina em águas ambientais /
Maíza de Lima Bueno. -- Jaboticabal, 2026
66 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Orientadora: Maísa Azevedo Beluomini

1. Biossensor. 2. Cianobactéria. 3. Fotobioeletroquímica. 4.
Monitoramento Ambiental. 5. Poluentes Emergentes. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa é amplo e estratégico, especialmente nas áreas de monitoramento ambiental, segurança hídrica, agricultura sustentável, desenvolvimento de tecnologias analíticas inovadoras, energia limpa e cooperação científica para aplicação em campo, alinhada aos múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, diretamente às ODS (3, 6, 7, 9, 11, 14 e 17). Demonstrando a viabilidade do biossensor fotobioeletroquímico baseado em cianobactérias para detecção precoce de atrazina em águas ambientais em concentrações traço, combinando sistemas biológicos vivos, nanotecnologia e transdução eletroquímica em uma plataforma sensível, de baixo custo, com princípios na química verde e análise ambiental sustentável, operando com baixo consumo energético, gerando menos resíduos, resposta rápida e mínima preparação de amostra. Do ponto de vista ambiental, o principal impacto está na possibilidade de fortalecer sistemas de alerta precoce, subsidiar ações de fiscalização e políticas públicas de biossensoriamento. A pesquisa demonstra potencial integração entre pesquisa acadêmica e demandas ambientais reais, gerando conhecimento aplicado e transferível, estabelecendo uma plataforma tecnológica com capacidade de evolução, adaptação e impacto direto na proteção da qualidade da água.

The potential impact of this research is broad and strategic, particularly in the areas of environmental monitoring, water security, sustainable agriculture, development of innovative analytical technologies, clean energy, and scientific cooperation for field applications, aligned with multiple United Nations Sustainable Development Goals, directly linked to SDGs (3, 6, 7, 9, 11, 14, and 17). It demonstrates the feasibility of a photobioelectrochemical biosensor based on cyanobacteria for early detection of atrazine in environmental waters at trace concentrations, combining living biological systems, nanotechnology, and electrochemical transduction into a sensitive, low-cost platform grounded in green chemistry and sustainable environmental analysis principles, operating with low energy consumption, generating minimal waste, offering rapid response, and requiring minimal sample preparation. From an environmental perspective, the main impact lies in the potential to strengthen early warning systems, support regulatory enforcement actions, and inform public biosensing policies. The research demonstrates the potential integration between academic research and real-world environmental needs, generating applied and transferable knowledge, and establishing a technological platform with capacity for evolution, adaptation, and direct impact on water quality protection.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: BIOSSENSOR FOTOBIOELETROQUÍMICO BASEADO EM *Synechococcus elongatus* PARA DETECÇÃO DE ATRAZINA EM ÁGUAS AMBIENTAIS

AUTORA: MAÍZA DE LIMA BUENO

ORIENTADORA: MAÍSA AZEVEDO BELUOMINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Microbiologia Agropecuária, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MAISA AZEVEDO BELUOMINI**
Data: 03/12/2025 11:25:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a MAÍSA AZEVEDO BELUOMINI (Participação Presencial)
Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **JOSE LUIZ DA SILVA**
Data: 03/12/2025 16:14:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ LUIZ DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Ciencias Exactas / Universidad Peruana Cayetano Heredia

Documento assinado digitalmente
 **POLIANA CRISTINA SPRICIGO**
Data: 03/12/2025 17:41:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. POLIANA CRISTINA SPRICIGO (Participação Presencial)
Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 02 de dezembro de 2025.

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Maíza de Lima Bueno, nasci no município de Jaboticabal-SP, em 02 de janeiro de 1991, cidade essa, onde em agosto de 2020, iniciei minha graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental, pela Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, nesta fui bolsista de Iniciação Científica e Tecnológica, recebi o honroso Prêmio Lavoisier, pela pesquisa desenvolvida e pelo notório desempenho acadêmico.

Ingressei em agosto de 2023 no mestrado em Microbiologia Agropecuária pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Universidade Estadual Paulista – (UNESP – FCAV), onde realizei a presente dissertação.

EPÍGRAFE

O propósito de cuidar da água e do meio ambiente, é uma missão do dom de Deus, a natureza é o divino na terra!

Laudato Si` Francisco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria, em especial minha mãe Marlene por todo cuidado e incentivo de força, minha irmã Ana Júlia pela ajuda e confiança, com carinho Luna e Vênus pelo companherismo. Após o salto o horizonte é vasto.

Agradeço à Profa Dra. Máisa Beluomini, em aceitar me orientar e por todo apoio prestado durante a pesquisa, em especial ao Dr. Caio Silva, pelos ensinamentos e grande ajuda para realizar este trabalho, vocês foram essenciais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES - Código de Financiamento 001).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo Auxílio à Pesquisa - Regular processo número 2025/03549-0.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agropecuária, campus Jaboticabal.

Agradeço ao Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental, ao Laboratório de Sensores Aplicados na Agropecuária (Profa. Dra. Máisa Azevedo Beluomini) e ao Laboratório de Bioquímica e Biologia Molecular (Profa. Dra. Maria Inês Ferro e Prof. Dr. Jesus Ferro) pelo empréstimo de equipamentos.

Agradeço imensamente ao Instituto de Química (IQ) UNESP-Araraquara, pelo apoio e excelência, que permitiu a realização de experimentos complexos, com destaque especial, ao IPBEN-IQ (Instituto de Pesquisa em Bioenergia) e ao Laboratório NDCOM, aos responsáveis Profa. Dra. Maria Valnice Boldrin e Prof. Dr. Nelson Ramos Stradiotto. Dedico o sucesso e concretização dessa pesquisa ao apoio recebido, pela estrutura e equipamentos de alta tecnologia, recursos humanos altamente especializados, qualificados e disponíveis, apoio institucional e financeiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Uso de defensivos agrícolas	2
2.2 Herbicidas e sistema fotossintético	7
2.3 Microorganismo cianobactéria	12
2.4 Biossensores	14
2.5 Biossensores e nanomateriais	17
3. OBJETIVOS	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Reagentes e soluções	20
4.2 Equipamentos	21
4.3 Condições de crescimento de cianobactérias	22
4.4 Curva de crescimento de cianobactérias	23
4.5 Síntese do nanomaterial $Ti_3C_2T_x$ MXene	25
4.6 Construção do biosensor biofotoânodo de cianobactérias	26
4.7 Configuração fotoeletroquímica	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Comportamento eletroquímico do MXene e PDA em GCE	28
5.2 Caracterização Morfológica	31
5.3 Desempenho fotobioeletroquímico biossensor baseado em cianobactérias	33
5.4 Otimização do biofotoânodo	34
5.5 Caracterização morfológica e eletroquímica do biofotoânodo	38
5.6 Efeito de atrazina no biofotoânodo de cianobactérias	40
5.7 Desempenho analítico do biofotoânodo na detecção de ATZ	42
5.8 Aplicação em amostra de água ambiental	45
6. CONCLUSÃO	46
7. REFERÊNCIAS	47

BIOSENSOR FOTOBIOELETROQUÍMICO BASEADO EM *Synechococcus elongatus* PARA DETECÇÃO DE ATRAZINA EM ÁGUAS AMBIENTAIS

RESUMO - Os herbicidas são uma das classes de pesticidas mais utilizados no mundo; porém, sua aplicação excessiva e descontrolada tem levantado sérias preocupações ambientais, uma vez que sua persistência no ambiente representa risco à saúde humana e aos ecossistemas. A detecção desses poluentes em baixas concentrações na água superficial e subterrânea é, portanto, essencial. Este trabalho relata o desenvolvimento de um biossensor fotobioeletroquímico baseado na imobilização do microrganismo cianobactéria, cepa *Synechococcus elongatus*, em um eletrodo de carbono vítreo (GCE) modificado com $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ (MXene) e polidopamina (PDA), para a detecção do herbicida atrazina em águas superficiais (rios), costeiras (oceano) e subterrâneas. A integração do MXene, um nanomaterial altamente condutivo e de grande área superficial, aprimorou a resposta da fotocorrente, enquanto a camada de PDA garantiu a imobilização celular eficaz e biocompatível, além de mediar a transferência de elétrons entre as células e o eletrodo. Essa interação revelou uma sinergia crucial para alcançar elevada intensidade de sinal sob luz. Após a exposição à atrazina, observou-se uma queda significativa na fotocorrente, consistente com a inibição do herbicida sobre o PSII (fotossistema II), que interrompe a cadeia de transporte de elétrons fotossintéticos. O sistema destaca-se por baixo custo, rápida resposta, alta sensibilidade ($\text{LD} = 0,37 \text{ nM}$ ou $0,08 \text{ ppm}$; $\text{LQ} = 1,12 \text{ nM}$ ou $0,24 \text{ ppm}$; $\text{Sa} = 177,71 \text{ nA cm}^{-2} \mu\text{M}^{-1}$) e mínima necessidade de preparo de amostra. Assim, este estudo valida sua aplicação como uma plataforma sensível e seletiva para o monitoramento ambiental de poluentes que inibem o sistema PSII, oferecendo uma ferramenta eficiente para a detecção precoce de poluentes emergentes, contribuindo para práticas sustentáveis de gestão ambiental.

Palavras-chave: Biossensor, cianobactéria, fotobioeletroquímica, herbicida, monitoramento ambiental, poluentes emergentes.

PHOTOBIOELECTROCHEMICAL BIOSENSOR BASED ON *Synechococcus elongatus* FOR DETECTION OF ATRAZINE IN ENVIRONMENTAL WATERS

ABSTRACT - Herbicides are one of the most widely used classes of pesticides worldwide; however, their excessive and uncontrolled application has raised serious environmental concerns, as their persistence in the environment poses risks to human health and ecosystems. Detecting these pollutants at low concentrations in water is therefore essential. This work reports the development of a photobioelectrochemical biosensor based on the immobilization of the cyanobacterial microorganism, *Synechococcus elongatus* strain, on a glassy carbon electrode (GCE) modified with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ (MXene) and polydopamine (PDA), for the detection of the herbicide atrazine in surface (rivers), coastal (ocean) and groundwater. The integration of MXene, a highly conductive nanomaterial with a large surface area, enhanced the photocurrent response, while the PDA layer ensured effective and biocompatible cell immobilization and mediated electron transfer between the cells and the electrode. This interaction revealed a crucial synergy for achieving high signal intensity under light. After exposure to atrazine, a significant drop in photocurrent was observed, consistent with the herbicide's inhibition of PSII (photosystem II), which disrupts the photosynthetic electron transport chain. The system stands out for its low cost, fast response, high sensitivity (LOD = 0.37 nM or 0.08 ppm; LOQ = 1.12 nM or 0.24 ppm; $S_a = 177.71 \text{ nA cm}^{-2} \mu\text{M}^{-1}$) and minimal sample preparation requirements. Thus, this study validates its application as a sensitive and selective platform for environmental monitoring of pollutants that inhibit the PSII system, offering an efficient tool for the early detection of emerging pollutants, contributing to sustainable environmental management practices.

Keywords: Biosensor, cyanobacteria, photobioelectrochemistry, herbicide, environmental monitoring, emerging pollutants

1. INTRODUÇÃO

Os biossensores são dispositivos analíticos sofisticados que combinam elementos biológicos, como enzimas, anticorpos, células ou ácidos nucleicos, com componentes eletrônicos ou ópticos para detectar substâncias específicas com alta seletividade e sensibilidade. Esses dispositivos funcionam através da interação entre o bioreceptor e a substância alvo, gerando uma resposta mensurável que é convertida em um sinal, possibilitando a quantificação precisa de compostos em baixas concentrações (Singh et al., 2021).

Na área ambiental, os biossensores desempenham um papel crucial no monitoramento de contaminantes emergentes (substâncias químicas artificiais ou naturais recém-identificadas em baixas concentrações no ambiente, com potencial risco à saúde humana e aos ecossistemas, como fármacos, pesticidas, disruptores endócrinos e microplásticos), e de elementos tóxicos convencionais, como metais pesados e poluentes orgânicos. Esses dispositivos oferecem vantagens significativas sobre métodos tradicionais de análise, incluindo detecção em tempo real, custos reduzidos e a possibilidade de medidas *in loco*, facilitando o monitoramento em áreas remotas ou de difícil acesso (Kimmel et al., 2011).

O emprego de microrganismos como agentes bioreconhecedores em biossensores eletroquímicos tem ganhado destaque por integrar componentes biológicos vivos às interfaces de transdução, resultando em maior sensibilidade, seletividade e estabilidade operacional desses dispositivos (Daniele et al., 2023).

Entre os microrganismos, as cianobactérias se destacam por apresentarem metabolismo fotossintético altamente eficiente, convertendo energia luminosa em sinais elétricos mensuráveis. Esse processo permite sua aplicação em dispositivos bioeletroquímicos, mas pode ser sensivelmente alterado pela presença de poluentes como a atrazina, um herbicida que atua inibindo a transferência de elétrons entre os fotossistemas II (PSII) e I (PSI). Essa inibição se manifesta como alterações detectáveis no sinal eletroquímico gerado pelas cianobactérias (Dias et al., 2025).

Uma das principais inovações deste trabalho está na integração da nanotecnologia com a fotobioeletroquímica na formação de sensores, proporcionando avanços significativos na sensibilidade e capacidade de detecção de compostos poluentes, como a atrazina, em ambientes aquáticos. Os nanomateriais

conferem aos biossensores alta área superficial, estabilidade operacional, excelente condutividade elétrica e eficiência na transdução dos sinais elétricos provenientes da interação com o alvo analítico (Ramesh et al., 2022).

Essa abordagem pode promover a obtenção de dados quantitativos de maneira eficiente, rápida, sensível, específica, minimamente invasiva e ambientalmente sustentável. O propósito dessa pesquisa foi investigar os níveis de concentração de atrazina que pode provocar a diminuição mensurável do sinal elétrico gerado por sistemas biológicos, além de desenvolver um biossensor inovador capaz de detectar atrazina em recursos hídricos naturais, e identificar águas ambientais contaminadas, como em águas de rios, oceânicas e subterrâneas, alcançando limites de detecção inferiores aos exigidos pela legislação vigente.

6. Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram o desenvolvimento bem-sucedido de um biofotoânodo à base de cianobactérias com desempenho fotoeletroquímico aprimorado para a detecção de atrazina. A integração do $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene como um nanomaterial condutor e de grande área superficial melhorou a resposta à fotocorrente. Ao mesmo tempo, a camada de PDA eletropolimerizada na superfície do eletrodo desempenhou um papel duplo na promoção da imobilização biocompatível e da transferência de elétrons entre as células de *S. elongatus* e a superfície do eletrodo. A otimização da concentração de MXene, espessura de PDA e quantidade de cianobactérias revelou que a sinergia entre esses componentes é essencial para alcançar elevada corrente sob iluminação.

A espectroscopia de impedância eletroquímica confirmou as modificações realizadas no eletrodo, por meio da análise da resistência de transferência de carga interfacial durante a construção do eletrodo. Apesar do aumento em R_{ct} com a incorporação da cianobactéria, o sistema manteve a geração eficiente de fotocorrente sob luz, conforme comprovado por dados da literatura sobre interfaces MXene-PDA.

É importante destacar que o biofotoânodo apresentou alta sensibilidade à atrazina, evidenciada por uma acentuada diminuição da fotocorrente após a exposição ao herbicida. Esse comportamento é consistente com o mecanismo bem estabelecido de inibição do PSII, no qual a atrazina se liga ao sítio QB, interrompendo o fluxo de elétrons e suprimindo a evolução de oxigênio.

Em suma, o fotobioeletrodo desenvolvido apresentou elevada sensibilidade e baixos limites de detecção para ATZ, alinhando-se ou superando sistemas reportados na literatura. A combinação MXene–PDA mostrou-se uma solução inovadora para interfaces bioeletroquímicas, reforçando o potencial do sensor no monitoramento ambiental.

7. Referências

[BRASIL.] Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005

Abbas Afkhami et al. Fabrication and application of a new modified electrochemical sensor using nano-silica and a newly synthesized Schiff base for simultaneous determination of Cd²⁺, Cu²⁺ and Hg²⁺ ions in water and some foodstuff samples. v. 771, p. 21–30, 1 abr. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.02.031>

Ahmad, F. et al. A review article on the photocatalytic degradation of atrazine by potential catalysts. **Next Materials**, v. 8, p. 100534, jul. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100534>

Aidar, e.; Kutner, M. B. B. Banco de Microrganismos Aidar & Kutner (BMA&K). Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), São Paulo, Brasil.

Aljhudaydi, A. M. et al. Novel sensitive electrochemical detection of paracetamol using magnetite/MXene electrode by differential pulse voltammetry. **International Journal of Electrochemical Science**, p. 100797–100797, 1 set. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100797>

Amani, A. M. et al. MXenes in biosensing: Enhancing sensitivity and flexibility – A review of properties, applications, and future directions. **Sensing and Bio-Sensing Research**, v. 47, p. 100732, 17 jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2024.100732>

Ansari, M. I. H. et al. Microfluidic-integrated DNA nanobiosensors. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 85, p. 247–260, nov. 2016. <https://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2016.05.009>

Antonacci, A. et al. A dual electro-optical biosensor based on *Chlamydomonas reinhardtii* immobilised on paper-based nanomodified screen-printed electrodes for herbicide monitoring. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 19, n. 1, 17 maio 2021. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00887-4>

Antonucci, A. et al. Carbon nanotube uptake in cyanobacteria for near-infrared imaging and enhanced bioelectricity generation in living photovoltaics. **Nature Nanotechnology**, v. 17, n. 10, p. 1111–1119, 12 set. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41565-022-01198-x>

Armin Vahid Mohammadi et al. Thick and freestanding MXene/PANI pseudocapacitive electrodes with ultrahigh specific capacitance. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 6, n. 44, p. 22123–22133, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1039/c8ta05807e>.

Bai, X. et al. Effects of atrazine on photosynthesis and defense response and the underlying mechanisms in *Phaeodactylum tricornutum*. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 22, n. 22, p. 17499–17507, 1 nov. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4923-7>

Baima, I. et al. Effects of pasture intensification and sugarcane cultivation on non-target species: A realistic evaluation in pesticide-contaminated mesocosms. **The Science of The Total Environment**, v. 922, p. 171425–171425, 1 mar. 2024. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.171425](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171425)

Beluomini, M. A. et al. Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymer on nanostructured carbon materials: A review. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 840, p. 343–366, maio 2019. [http://DOI:10.1016/j.jelechem.2019.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.005)

Brasileiros consomem 7 litros de agrotóxicos por ano, revela a revista Problemas Brasileiros. Disponível em: <<https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/consea/noticias/2017/brasileiros-consumem-7-litros-de-agrotoxicos-por-ano-revela-a-revista-problemas-brasileiros>>. Acesso em: 16 jan. 2026.

Bula Atrazina SD 500 SC. Disponível em: <https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2020-10/atrazinasd500sc.pdf>. Acesso em 10/06/25

Buket Bezgin Carbas et al. Construction of novel cyanobacteria-based biological photovoltaic solar cells: Hydrogen and photocurrent generated via both photosynthesis and respiratory system. **Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry**, v. 442, p. 114764–114764, 15 abr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114764>

Buyukharman, M.; Mulazimoglu, I. E.; Yildiz, H. B. Construction of a Conductive Polymer/AuNP/Cyanobacteria-Based Biophotovoltaic Cell Harnessing Solar Energy to Generate Electricity via Photosynthesis and Its Usage as a Photoelectrochemical Pesticide Biosensor: Atrazine as a Case Study. **ACS Omega**, v. 9, n. 14, p. 16249–16261, 27 mar. 2024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10308>

Buyukharman, M. et al. Electrospun graphene-cellulose acetate/Paulschulziapseudovolvox (Algae) modified photoelectrodes generating electricity via harnessing solar energy: A novel biosensing design for photoelectrochemical pesticide detection via photosynthesis inhibition. **Electrochimica Acta**, v. 525, p. 146099, 23 mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146099>

Buscemi, G. et al. Bio-Inspired Redox-Adhesive Polydopamine Matrix for Intact Bacteria Biohybrid Photoanodes. **ACS applied materials & interfaces**, v. 14, n. 23, p. 26631–26641, 31 maio 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02410>

Cattley, R. C. et al. Carcinogenicity of atrazine, alachlor, and vinclozolin. **The Lancet Oncology**, nov. 2025. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(25\)00702-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(25)00702-8)

Cevik, E.; Buyukharman, M.; Yildiz, H. B. Construction of efficient bioelectrochemical devices: Improved electricity production from cyanobacteria (*Leptolyngbiasp.*) based on π -conjugated conducting polymer/gold nanoparticle composite interfaces. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 116, n. 4, p. 757–768, 4 jan. 2019. <https://doi.org/10.1039/d1nr04961e>

Chadha, U. et al. Recent progress and growth in biosensors technology: A critical review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 109, p. 21–51, maio 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.010>

Chi, W.; SUN, X.; ZHANG, L. The roles of chloroplast proteases in the biogenesis and maintenance of photosystem II. v. 1817, n. 1, p. 239–246, 1 jan. 2012.

Chiam, S. L.; Leo, C. P.; Pung, S.-Y. MXene hydrogel as a flexible platform: Recent synthesis, properties, and applications. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 185, p. 109016, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109016>

Cooke, S. J. et al. Managing exploitation of freshwater species and aggregates to protect and restore freshwater biodiversity. **Environmental Reviews**, 2 ago. 2023. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0118>

Croisetière, L.; Rouillon, R.; Carpentier, R. A simple mediatorless amperometric method using the cyanobacterium *Synechococcus leopoliensis* for the detection of phytotoxic pollutants. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 56, n. 1-2, p. 261–264, 1 jul. 2001. doi.org/10.1007/s002530100652

Damiani, S. et al. Water and sediment pesticide contamination on indigenous lands surrounded by oil palm plantations in the Brazilian Amazon. **Heliyon**, v. 9, n. 10, p. e19920–e19920, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19920>

Danielle, L. et al. Photobioelectrocatalysis of Intact Photosynthetic Bacteria Exposed to Dinitrophenol. **ChemElectroChem**, v.10, n.12, 26 abr. 2023. <https://doi.org/10.1002/celec.202300013>

De Lima, L. F. et al. Bacterial Cellulose-Based Laser-Scribed Graphene Electrode for Hydrogen Peroxide Detection in Cancer Cells. **ACS Applied Bio Materials**, v. 8, n. 7, p. 6339–6349, 29 jun. 2025. <https://doi.org/10.1021/acsabm.5c00825>

Dias, M. A. et al. Pesticides in rainwater: A two-year occurrence study in an unexplored environmental compartment in regions with different land use in the State of São Paulo – Brazil. **Chemosphere**, v. 372, p. 144093, 13 jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144093>

Dias, M. C. et al. Photobioelectrochemical sensor based on WO₃ modified by chloroplast as a platform for simazine detection in environmental waters. **Microchemical Journal**, v. 218, p. 115374–115374, 17 set. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115374>.

Dong, T. et al. Advances in Electrochemical Biosensors Based on Nanomaterials for Protein Biomarker Detection in Saliva. **Advanced Science**, v. 10, n. 6, 30 dez. 2022. <https://doi.org/10.1002/advs.202205429>

E. Touloupakis et al. A multi-biosensor based on immobilized Photosystem II on screen-printed electrodes for the detection of herbicides in river water. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 20, n. 10, p. 1984–1992, 12 out. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2004.08.035>

Fan, A. **Public Health Goal for Atrazine In Drinking Water**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://oehha.ca.gov/sites/default/files/media/downloads/water/public-health-goal/atrazf.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal - 6ed. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=PpO4DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Taiz+e+Zeiger+\(2017\)&ots=7SFouWGORd&sig=snXtk3FjbRdcVP6yj9LLcgkVII0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=PpO4DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Taiz+e+Zeiger+(2017)&ots=7SFouWGORd&sig=snXtk3FjbRdcVP6yj9LLcgkVII0#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 4 out. 2025.

Germinare, B. F. et al. Sustainable electrochemical sensor from CO₂ laser pyrolyzed green leaves for carbendazim detection. **Microchemical Journal**, v. 218, p. 115136, nov. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115136>

Gholivand, M. B.; Karimian, N.; Torkashvand, M. A graphene-based electrochemical sensor for sensitive determination of cyanazine. **Journal of Analytical Chemistry**, v. 70, n. 3, p. 384–391, mar. 2015. <https://doi.org/10.1134/S1061934815030077>

Ghosh, S. et al. MXenes: A Promising Avenue for Sustainable Nanotechnology. **Lecture notes in nanoscale science and technology**, p. 29–50, 1 jan. 2026. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05719-8_2

Gonzalez-Aravena, A. C. et al. Tapping into cyanobacteria electron transfer for higher exoelectrogenic activity by imposing iron limited growth. **RSC Advances**, v. 8, n. 36, p. 20263–20274, 30 maio 2018. [https://DOI: 10.1039/c8ra00951a](https://doi.org/10.1039/c8ra00951a)

Grattieri, M.; Hasan, K.; Minter, S. D. Bioelectrochemical Systems as a Multipurpose Biosensing Tool: Present Perspective and Future Outlook. **ChemElectroChem**, v. 4, n. 4, p. 834–842, 16 nov. 2016. <https://doi.org/10.1002/celec.201600507>

Guillaume Octobre et al. Herbicide detection: A review of enzyme- and cell-based biosensors. **Environmental research**, p. 118330–118330, 1 fev. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118330>.

Heinz, S. et al. Analysis of photosystem II biogenesis in cyanobacteria. **Biochimica Et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1857, n. 3, p. 274–287, 1 mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2015.11.007>

Herbicide Handbook Auxin Binding Protein 1 HPPD AHAS/ALS. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://wssa.net/wp-content/uploads/Christian-Willenborg-herbicide-handbook-2014.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Huang, C.-W. et al. A review of biosensor for environmental monitoring: principle, application, and corresponding achievement of sustainable development goals. **Bioengineered**, v. 14, n. 1, p. 58–80, 28 jun. 2023. doi: [10.1080/21655979.2022.2095089](https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2095089)

Huang, X.; Zhu, Y.; Kianfar, E. Nano Biosensors: Properties, applications and electrochemical techniques. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 1649–1672, maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.048>

Huang, X.; Zhu, Y.; Kianfar, E. Nano Biosensors: Properties, applications and electrochemical techniques. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 1649–1672, maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.048>

Jae Hong Kim; Min Ah Lee; Chan Beum Park. Polydopamine as a Biomimetic Electron Gate for Artificial Photosynthesis. v. 53, n. 25, p. 6364–6368, 1 abr. 2014. <https://doi.org/10.1002/anie.201402608>.

Karimi-Maleh, H. et al. Cyanazine herbicide monitoring as a hazardous substance by a DNA nanostructure biosensor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 423, p. 127058, fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127058>

Khan, M. Z. H. et al. Ultrasensitive detection of pathogenic viruses with electrochemical biosensor: State of the art. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 166, p. 112431, 15 out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112431>

Kimmel, D. W. et al. Electrochemical Sensors and Biosensors. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 2, p. 685–707, 11 nov. 2011. <https://doi.org/10.1021/ac202878q>

Kumar, R. et al. A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 6, p. 100219, dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100219>

Lea-Smith, D. J. et al. Photosynthetic, respiratory and extracellular electron transport pathways in cyanobacteria. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1857, n. 3, p. 247–255, mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2015.10.007>

Li, Z. et al. Electrochemical determination of epinephrine based on Ti3C2Tx MXene-reduced graphene oxide/ITO electrode. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 895, p. 115425, ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115425>

Li, Q. et al. Two-Dimensional MXene-Polymer Heterostructure with Ordered In-Plane Mesochannels for High-Performance Capacitive Deionization. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 60, n. 51, p. 26528–26534, 8 nov. 2021. <https://doi.org/10.1002/anie.202111823>.

Luo, S. et al. Algal-microbial community collaboration for energy recovery and nutrient remediation from wastewater in integrated photobioelectrochemical systems. **Algal Research**, v. 24, p. 527–539, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.006>

Maly, J. et al. Direct mediatorless electron transport between the monolayer of photosystem II and poly(mercapto-p-benzoquinone) modified gold electrode—new design of biosensor for herbicide detection. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 21, n. 6, p. 923–932, 15 dez. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2005.02.013>

Mandal, R.; Dutta, G. From photosynthesis to biosensing: Chlorophyll proves to be a versatile molecule. **Sensors International**, v. 1, n. 1, p. 100058, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100058>

Montagner, C. C.; Vidal, C.; Acayaba, R. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, 11 jul. 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>

Mousa Alghuthaymi et al. Carbon nanotubes: An efficient sorbent for herbicide sensing and remediation. **Elsevier eBooks**, p. 429–457, 1 jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819786-8.00019-0>

Nezami, S.; GHAEMI, A.; YOUSEFI, T. Experimental exploring of Ti3C2Tx MXene for efficient and deep removal of magnesium in water sample. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 11 nov. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78942-x>

Nowell, L. H.; Capel, P. D.; Dileanis, P. D. **Pesticides in Stream Sediment and Aquatic Biota**. [s.l.] Informa, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429104435>

Okedi, T. I.; Fisher, A. C.; Yunus, K. Quantitative analysis of the effects of morphological changes on extracellular electron transfer rates in cyanobacteria. **Biotechnology for Biofuels**, v. 13, n. 1, 26 ago. 2020. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01788-8>

Patussi, C.; Bundchen, M. Avaliação in situ da genotoxicidade de triazinas utilizando o bioensaio Trad-SHM de Tradescantia clone 4430. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, n. 4, p. 1173–1178, abr. 2013. <https://DOI:10.1590/s1413-81232013000400030>

Pescheck, M.; Schweizer, A.; Ludek Bláha. Innovative electrochemical biosensor for toxicological investigations on algae and cyanobacteria. **Bioelectrochemistry**, v. 143, p. 107926–107926, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107926>

Pesticides use and trade, 1990–2022. 16 jul. 2024. <https://doi.org/10.4060/cd1486en> <<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a8a8c2c8-ee36-42e8-a619-7e73c8daf8a6/content>>.

PIB DO AGRONEGÓCIO REGISTRA CRESCIMENTO DE 6,49% NO PRIMEIRO TRIMESTRE DE 2025. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cepea.org.br/upload/kceditor/files/ct-pib-do-agro-17jun25.pdf>>. Acesso em 30/12/2025

Powles, S.; Preston, C. **Herbicide Cross Resistance and Multiple Resistance in Plants**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://hracglobal.com/files/Herbicide-Cross-Resistance-and-Multiple-Resistance-in-Plants.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Prudkin-Silva, C. et al. A cost-effective algae-based biosensor for water quality analysis: Development and testing in collaboration with peasant communities. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, p. 101479, 1 maio 2021. <http://DOI:10.1016/j.eti.2021.101479>

Ramesh, M. et al. Nanotechnology-Enabled Biosensors: A Review of Fundamentals, Design Principles, Materials, and Applications. **Biosensors**, v. 13, n. 1, p. 40, 27 dez. 2022. <https://doi.org/10.3390/bios13010040>

Reggente, M. et al. Polydopamine-coated photoautotrophic bacteria for improving extracellular electron transfer in living photovoltaics. **Nano Research**, v. 17, n. 2, p. 866–874, 25 jan. 2024. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-6396-1>.

Relatórios de comercialização de agrotóxicos. Disponível:

<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#sobreosrelatorios> Acesso em: 12/02/2026

Rippka et al. Generic Assignments, Strain Histories and Properties of Pure Cultures of Cyanobacteria. **Journal of General Microbiology** (1979), 111, 1-61.

Ribeiro, M. L. et al. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 688–694, jun. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000300031>

Rosenfeld, P. E.; Feng, L. G. H. Emerging Contaminants. **Risks of Hazardous Wastes**, p. 215–222, 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7842-7.00016-7>

Santos, M. V. et al. Eficácia e persistência no solo de herbicidas utilizados em pastagem. **Planta Daninha**, v. 24, n. 2, p. 391–398, 1 jun. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000200024>

Santoro, C. et al. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. **Journal of Power Sources**, v. 356, p. 225–244, jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>

Samsidar, A.; Siddiquee, S.; Shaarani, S. M. A review of extraction, analytical and advanced methods for determination of pesticides in environment and foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 71, p. 188–201, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.011>

Sass, J. B.; Colangelo, A. European Union bans atrazine, while the United States negotiates continued use. **International journal of occupational and environmental health**, v. 12, n. 3, p. 260–7, 2006. DOI: [10.1179/oeht.2006.12.3.260](https://doi.org/10.1179/oeht.2006.12.3.260)

Sekar, N. et al. Role of respiratory terminal oxidases in the extracellular electron transfer ability of cyanobacteria. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 115, n. 5, p. 1361–1366, 7 fev. 2018. [https://DOI: 10.1002/bit.26542](https://doi.org/10.1002/bit.26542)

Shao, C. Y. et al. Novel Cyanobacterial Biosensor for Detection of Herbicides. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 68, n. 10, p. 5026–5033, out. 2002. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.10.5026-5033.2002>

Shah, S. A. et al. Template-free 3D titanium carbide (Ti₃C₂T_x) MXene particles crumpled by capillary forces. **Chemical Communications**, v. 53, n. 2, p. 400–403, 2017. <https://doi.org/10.1039/c6cc07733a>.

Singh, A. et al. Recent Advances in Electrochemical Biosensors: Applications, Challenges, and Future Scope. **Biosensors**, v. 11, n. 9, p. 336, 14 set. 2021. doi.org/10.3390/bios11090336

Song, R.-B. et al. Living and Conducting: Coating Individual Bacterial Cells with In Situ Formed Polypyrrole. **Angewandte Chemie**, v. 56, n. 35, p. 10516–10520, 26 jun. 2017. <https://doi.org/10.1002/anie.201704729>

Sobolev, V.; Edelman, M. Modeling the quinone-B binding site of the photosystem-II reaction center using notions of complementarity and contact-surface between atoms. **Proteins Structure Function and Bioinformatics**, v. 21, n. 3, p. 214–225, 1 mar. 1995. <https://doi.org/10.1002/prot.340210304>

Sobrinho, Alessandra & Teixeira, Bruno & Sobrinho, Alexandre & Souza, Jesus. (2023). Fundamentos, potencialidades e aplicações de biossensores: uma atualização. 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/livros/3336.

Sumitha, M. S.; Xavier, T. S. Recent advances in electrochemical biosensors – A brief review. **Hybrid Advances**, v. 2, p. 100023, jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100023>.

Sun, G. et al. Harnessing in-situ oxidation of nanostructured mxene to modulate the electronic structure for improved selectivity for electrochemical carbon dioxide reduction. **Nano Energy**, v. 132, p. 110385–110385, 19 out. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110385>

Szewczyk et al. Polydopamine films: Electrochemical growth and sensing applications. **European Polymer Journal**, v. 174, p. 111346, 1 jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111346>

Tian, L.-J. et al. Substrate Metabolism-Driven Assembly of High-Quality CdS_xSe_{1-x} Quantum Dots in *Escherichia coli*: Molecular Mechanisms and Bioimaging Application. **ACS Nano**, v. 13, n. 5, p. 5841–5851, 10 abr. 2019. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b01581>

Tucci, M. et al. Microbial amperometric biosensor for online herbicide detection: Photocurrent inhibition of *Anabaena variabilis*. **Electrochimica Acta**, v. 302, p. 102–108, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.007>

Tucci, M. et al. A Storable Mediatorless Electrochemical Biosensor for Herbicide Detection. **Microorganisms**, v. 7, n. 12, p. 630, 29 nov. 2019. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120630>

Usos da água. Disponível em: <<https://conjuntura-2025.webflow.io/usos-da-agua#irrigacao>> Acesso em: 30 dez. 2025.

Varol, H. S. et al. Electropolymerization of Polydopamine at Electrode-Supported Insulating Mesoporous Films. **Chemistry of Materials**, v. 35, n. 21, p. 9192–9207, 2 nov. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01890>.

Varuni, P.; Menon, S. N.; Menon, G. I. Phototaxis as a Collective Phenomenon in Cyanobacterial Colonies. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, dez. 2017. <http://DOI:10.1038/s41598-017-18160-w>

Vega-Morales, T. et al. Magnetic-based microextraction systems for the determination of emerging contaminants in environmental liquid samples. **TrACTrends in Analytical Chemistry**, v. 183, p. 118116, fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118116>

Viola, S. et al. Probing the electric field across thylakoid membranes in cyanobacteria. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 43, p. 21900–21906, 7 out. 2019. <https://doi: 10.1073/pnas.1913099116>

Xu, C. et al. Portable and wearable self-powered systems based on emerging energy harvesting technology. **Microsystems & Nanoengineering**, v. 7, n. 1, 17 mar. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00248-z>

Yu, J. et al. *Synechococcus elongatus* UTEX 2973, a fast growing cyanobacterial chassis for biosynthesis using light and CO₂. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 8132, 30 jan. 2015. <http://DOI:10.1038/srep08132>

Wang, Q. et al. Phytotoxicity of atrazine combined with cadmium on photosynthetic apparatus of the emergent plant species *Iris pseudacorus*. v. 29, n. 23, p. 34798–34812, 18 jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18107-9>

Washington, W. et al. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://archive.epa.gov/scipoly/sap/meetings/web/pdf/042810transcript.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Wu, H. et al. Construction of a Zinc Porphyrin–Fullerene-Derivative Based Nonenzymatic Electrochemical Sensor for Sensitive Sensing of Hydrogen Peroxide and Nitrite. **Analytical Chemistry**, v. 86, n. 13, p. 6285–6290, 19 jun. 2014. <https://doi.org/10.1021/ac500245k>

Zhang, W. et al. Enhancing electricity generation and pollutant degradation in microbial fuel cells using cyanobacteria-derived biochar electrodes. **Bioresource Technology**, v. 418, p. 132000–132000, 19 dez. 2024. DOI: [10.1016/j.biortech.2024.132000](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.132000)

Zsuzsanna Kuklenyik et al. Two-dimensional high performance liquid chromatography separation and tandem mass spectrometry detection of atrazine and its metabolic and hydrolysis products in urine. **Journal of Chromatography B**, v. 901, p. 1–8, 27 jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2012.05.028>

Zeng, Q. et al. Fast Electrodeposition of MXene/PDA Composites for High-Performance Bioelectronic Interfaces: An In Vitro Evaluation. **Advanced Functional Materials**, v. 34, n. 23, 14 fev. 2024. <https://doi.org/10.1002/adfm.202312770>.