
Biodegradação e biorremediação de nitroaromáticos

Luís Felipe Oliva dos Santos, Gustavo Henrique de Souza e Graciela Beatris Lopes

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-03-9.c4>

Resumo

Dentre os diversos compostos químicos utilizados na indústria moderna destacam-se os compostos nitroaromáticos, os quais são encontrados em pesticidas, corantes têxteis, aditivos de polímeros, explosivos, produtos à base de plástico, entre outros; devido às suas propriedades físico-químicas altamente estáveis e recalcitrantes, é de difícil degradação, tornando-o um resíduo importante e com capacidade de gerar inúmeros impactos ambientais; atualmente esses compostos são encontrados tanto em ambientes aquáticos como na atmosfera. Hidrocarbonetos oriundos da combustão incompleta de combustíveis fósseis, assim como processo de combustão natural, possibilitam o processo de nitração, assim formando compostos nitroaromáticos, além dos que são liberados no ambiente devido a descartes incorretos e descarte de efluentes industriais. Os compostos nitroaromáticos são considerados como amplamente tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias e técnicas para realizar a biodegradação de compostos nitroaromáticos é extremamente essencial. Assim, objetivou-se realizar uma revisão bibliográfica, acerca dos principais métodos de biodegradação de compostos nitroaromáticos.

Palavras-Chaves: Biodegradação, Fungos, Bactérias, Xenobióticos, Nitroaromáticos.

Abstract

Among the various chemical compounds used in modern industry, nitroaromatic compounds are quite ubiquitous. They are found in pesticides, textile dyes, polymer additives, explosives, plastic-based products, among others. Due to their highly stable and recalcitrant physico-chemical properties, they are difficult to degrade, what makes them important pollutants with the capacity of generating numerous environmental impacts. Currently these compounds are found in both aquatic environments and in the atmosphere. Hydrocarbons resulting from the incomplete combustion of fossil fuels, as well as from the natural combustion process, enable the nitration process, thus forming nitroaromatic compounds. To these one has to add those released into the environment due to incorrect disposal of industrial effluents. Nitroaromatic compounds are largely toxic, mutagenic, and carcinogenic. For this reason, the development of technologies and procedures to carry out the biodegradation of nitroaromatic compounds is extremely needed. In this context, the objective of this essay was to carry out a literature review about the main methods of biodegradation of nitroaromatic compounds.

Keywords: Biodegradation, Fungi, Bacteria, Xenobiotics. Nitroaromatics.

1. Introdução

Dentre os diversos grupos químicos utilizados na indústria moderna destaca-se os compostos nitroaromáticos (NACs); constituído de moléculas orgânicas integradas a no mínimo um radical (-NO₂) ligado a um anel aromático (Figura 1). Com origem sintética e/ou biológica, o grupo apresenta forte eletronegatividade derivada de dois átomos de oxigênio (com déficit elétrico) ligados a um átomo de nitrogênio parcialmente positivado.

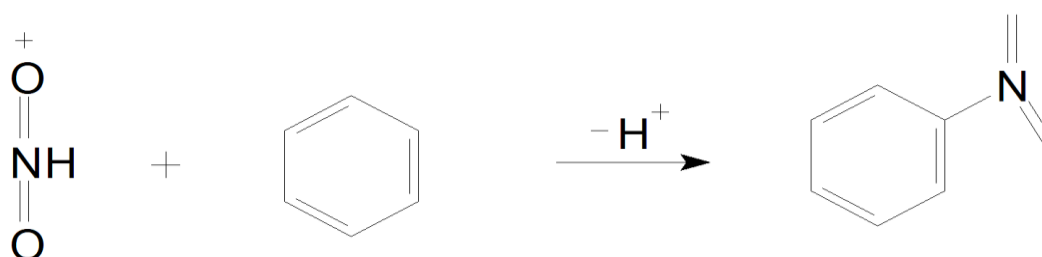


Figura 1. O grupamento nitroaromático. Fonte: Figura elaborada pelos autores através do “software” Chemwindow ®, 2022.

Se associado a um anel aromático (benzeno), o grupamento nitroso pode realocar os elétrons π (pi) do anel aromático, de modo a balancear a sua carga. Desse modo, o grupamento nitroaromático obtém propriedades físico-químicas altamente estáveis e recalcitrantes, que dificultam a sua degradação, tornando-o um resíduo importante e com capacidade de gerar inúmeros impactos ambientais (TIWARI et al., 2019; BILAL et al., 2021).

Atualmente é possível observar a ocorrência de compostos nitroaromáticos em ambientes aquáticos e na atmosfera. Em centros urbanos, os hidrocarbonetos oriundos da combustão incompleta de combustíveis fósseis, bem como os processos de combustão natural, possibilitam o processo de nitração, através da reação do dióxido de carbono com o dióxido de nitrogênio presente na atmosfera (LU et al., 2019; WANG et al., 2017).

Nos ambientes aquáticos a luz solar catalisa reações de nitração e halogenação de compostos que ocorrem naturalmente ou devido à interferência humana (ZHOU et al., 2016). Desse modo, a irradiação solar de orgânicos dissolvidos, metais, nitrato ou nitrito podem gerar radicais hidroxila, os quais

servem então para catalisar reações tanto de halogenação quanto nitração de compostos orgânicos.

Ademais, a irradiação de águas marítimas contendo fenóis resultam na produção não apenas do 2-nitrofenol e 4-nitrofenol, mas também de clorofenóis e bromofenóis (CALZA et al., 2008), que em contato com a atmosfera, produzem nitro-PAHs e nitrofenóis, que podem ser depositados no solo por chuvas ou neve (VIONE et al., 2005). Quando presentes na atmosfera, os compostos nitroaromáticos (NACs) também incluem os nitrofenóis (NP) nitro catecol (NC), os ácidos nitrosalicílico (NSA) entre outros compostos que absorvem a luz, e que podem afetar a visibilidade da atmosfera e equilíbrio da radiação solar (CHOW et al., 2015; LIN et al., 2017, 2018; TEICH et al., 2017; WANG et al., 2018, 2019).

Paralelamente, podemos encontrar compostos nitroaromáticos oriundos de bactérias, fungos e plantas (TIWARI et al., 2019). A exemplo, as bactérias do gênero *Streptomyces*, conhecidas por produzir uma ampla variedade de antibióticos, incluindo aqueles com componentes nitroaromáticos, como o chloramphenicol (originalmente denominado cloromicetina, produzido por *Streptomyces venezuelae*) (EHRlich et al., 1948).

De modo geral, compostos nitroaromáticos são amplamente tóxicos e mutagênicos, sendo considerados carcinogênicos (TIWARI et al., 2019); pois as mesmas propriedades que permitem que os compostos nitroaromáticos sejam úteis em aplicações químicas, também os fazem serem nocivos à saúde tanto de humanos, quanto de animais. Em suma, as moléculas nitroaromáticas interagem com as fitas de DNA, desestabilizando-as e provocando a ocorrência de mutações pontuais ou extensivas, gerando inúmeros danos a maquinaria celular, que em casos extremos podem inclusive inviabilizar a sobrevivência do indivíduo (KUMAR et al., 2017; HAO et al., 2020).

Na indústria e em lavouras, os compostos nitroaromáticos são encontrados em pesticidas, corantes têxteis, aditivos de polímeros, explosivos, produtos à base de plástico, entre outros (CAI et al., 2018; BAGHERI et al., 2021). Quando descartados sem o tratamento prévio necessário, essas moléculas são acumuladas em superfícies aquáticas, lençóis freáticos, solo, plantas, e até mesmo em tecido animal; o que dificulta ainda mais o processo de biorremediação das mesmas (TIWARI et al., 2019; KUMAR et al., 2020).

Sendo assim, torna-se essencial e imprescindível a conscientização da população acerca dos possíveis danos causados por compostos nitroaromáticos, bem como, o investimento em pesquisa e desenvolvimento de alternativas sustentáveis e eficientes para a biorremediação de tais moléculas (TINKOV et al., 2016; BILAL et al., 2021).

Por tanto, o presente capítulo objetiva a elucidação dos principais conceitos acerca dos compostos nitroaromáticos, bem como, a realização de uma revisão bibliográfica integrativa e concisa sobre os principais métodos de biodegradação de nitroaromáticos; a fim de fornecer suporte teórico qualificado para futuras pesquisas na área de Biotecnologia Ambiental, Biorremediação e Biodegradação.

2. Metodologia

Visando a elaboração de um referencial teórico atualizado e com alta qualidade, foi realizada uma busca de artigos científicos e livros nas bases de dados: Pubmed, SciElo, Google Scholar, e Periódicos Capes.

Para tanto, foram utilizados os termos “Biorremediação”, “Nitroaromáticos”, “Biodegradação” e “Degradação TNT” (em inglês “Bioremediation”, “Nitroaromatics”, “Biodegradation” e “Degradation TNT” respectivamente). Com base na pesquisa, foram selecionados apenas os documentos que contemplavam os objetivos propostos pelo presente trabalho, selecionando-se preferencialmente os documentos publicados entre os anos de 2016 e 2022.

3. Nitroaromáticos e meio ambiente

Compostos nitroaromáticos são amplamente tóxicos e mutagênicos, sendo a maioria suspeitos ou já estabelecidos como carcinogênicos (KUMAR et al., 2017; BILAL et al., 2021); considerados como poluentes prioritários por muitos países (ZHANG; ZHANG, 2015). Entretanto, tais compostos são amplamente utilizados na agricultura, indústria farmacêutica, indústria têxtil, como os compostos nitro fenólicos presentes em corantes orgânicos, etc. (CHEN et al., 2015; CHENG et al., 2016; CHENG et al., 2017; ZHOU et al., 2020; XIAO et al., 2021). Sendo assim, são essenciais para desenvolvimento do país, especialmente na área da segurança territorial, visto que, a grande maioria dos

explosivos e munições bélicas utilizam nitroaromáticos como TNT (2,4,6-trinitrotolueno), o TNP (2,4,6-trinitrofenol) e o DNT (2,4-dinitrotolueno) (Figura 2); que consistem em uma mistura de químicos oxidantes, que quando em decomposição sofrem alta ação exotérmica, causando sérios problemas de poluição ambiental (TANYA et al., 2018).

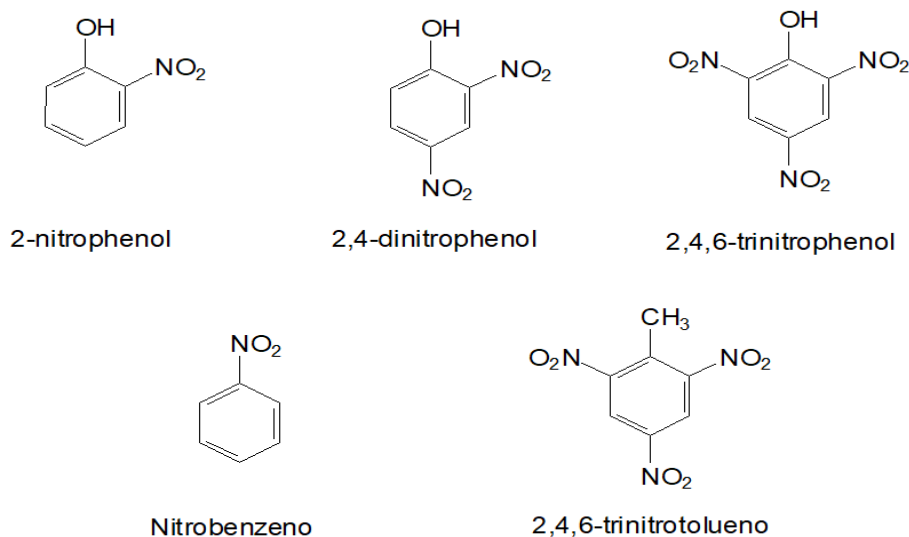


Figura 2. Exemplos de compostos nitroaromáticos. Fonte: Figura elaborada pelos autores, através do “software” Chemwindow ®, 2022.

Devido ao amplo uso e aplicabilidade dos nitroaromáticos, torna-se cada vez mais difícil proibir a sua produção e descarte, que eventualmente ocorre sem o tratamento adequado; poluindo a água, solo, reservas aquáticas subterrâneas, causando inúmeros danos ao meio ambiente, fauna e flora (CHENG et al., 2016; HUANG et al., 2016; KARIKALAN et al., 2017).

De acordo com Kumar e colaboradores (2020) existem cerca de 65 mil categorias de poluentes nitroaromáticos que podem ser gerados por diversas indústrias químicas. Apenas de Nitrobenzeno (NB), por exemplo, são liberadas cerca de 9.000 toneladas de resíduos em ambientes aquáticos anualmente (KUMAR et al., 2020).

No entanto, deve-se atentar que, as mesmas propriedades que permitem que os compostos nitroaromáticos sejam úteis em aplicações químicas, também os fazem serem nocivos à saúde tanto de humanos, quanto de animais. As

interações dos compostos nitroaromáticos com o DNA, bem como o resultado da mutagenicidade foi caracterizado extensivamente e relacionado a uma variedade de compostos nitroaromáticos monocíclicos, policíclicos e heterocíclicos (PUROHIT; BASU 2000; KARIKALAN et al., 2017; LIU et al., 2019, 2021).

A natureza recalcitrante dos nitroaromáticos se dá devido a sua substituição anormal do anel aromático condensado, gerando insolubilidade em fase aquosa e sua resistência à degradação biótica e abiótica. Por essa razão, a maioria dos nitroaromáticos são identificados como potenciais neurotóxicos, disruptores endócrinos, carcinogênicos, mutagênicos e teratogênicos.

Ademais, Nitro-PAHs formados na atmosfera através de reações radicalares também contribuem para poluição aérea em áreas urbanas, visto que, a exaustão dos motores de combustão contém hidrocarbonetos sujeitos a nitração, sendo a maior fonte de poluição atmosférica, os veículos motorizados movidos a diesel. O processo de exaustão do diesel libera PAHs como o naftaleno, acenafteno, fluoreno, antraceno e pireno, os quais possuem propriedades mutagênicas e carcinogênicas; e a adição do grupo nitro nesses compostos aumenta sua toxicidade e o nível de ameaça à saúde humana (WANG et al., 2017; LU et al., 2019; LIU et al., 2019, 2021).

4. Decomposição nitroaromática

Há muitos métodos químicos e físicos que podem ser utilizados para degradação dos nitroaromáticos, como adsorção, processos de oxidação avançada (AOPs), redução eletroquímica e micro eletrólise. Entretanto, esses processos de tratamento apresentam altos custos, bem como, a formação de subprodutos eventualmente mais tóxicos, tornando-se ineficientes, principalmente quando aplicados a moléculas grandes e complexas como de pesticidas (JIANG et al., 2016; YUAN et al., 2017 PARTE et al. 2017).

Sendo assim, foram desenvolvidas pesquisas com modelos biológicos que consistem em um melhor custo-benefício sendo considerados ecologicamente corretos e eficientes na remoção de NACs de áreas contaminadas; tanto por bioaugmentação, bioestimulação, atenuação natural, "biosparging", *in situ*, *ex situ*, "landfarming" ou compostagem. Destaca-se aqui, que por se tratar de sistemas biológicos complexos, o tempo necessário para a

completa descontaminação pode ser maior, quando comparado aos métodos físico-químicos (SHAER et al. 2013; ISHAG et al. 2017).

Contudo, a transformação por redução, especialmente bio-redução, tem sido considerada como uma alternativa confiável e com bom custo-benefício para remoção de NACs (WANG et al. 2016). De acordo com Bilal et al. (2021) linhagens microbianas selvagens podem utilizar os NACs através de suas vias metabólicas, utilizando o carbono e nitrogênio presentes nas moléculas nitroaromáticas como fonte de energia, convertendo-as em moléculas não tóxicas. Segundo Bilal, et al., 2021; Xiao et al., 2021; Wang et al., 2021, os fungos, algas e bactérias seriam, portanto, uma opção viável para biorremediação de xenobióticos nitroaromáticos.

5. Biorremediação de nitroaromáticos por fungos

A biorremediação de nitroaromáticos por fungos tem ganhado destaque nas últimas décadas devido aos excelentes custos e benefícios encontrados no cultivo dos seus representantes, sejam uni ou pluricelulares. A exemplo, Kist et al. (2020) relataram que as variáveis de maior influência na degradação de 2,4 e 2,6-dinitrotolueno são a concentração do co-substrato (Glicose) e as espécies de fungo empregadas (*Pleurotus ostreatus* e *Pleurotus floridae*). Em seus estudos, conduzidos em uma condição otimizada (*Pleurotus floridae*, pH inicial de 6.0 e 10 g L⁻¹ glucose), os autores obtiveram resultados significativos na redução da demanda química de oxigênio (DQO), no fator de toxicidade para *Daphnia magna*, bem como, na remoção total de compostos dinitroaromáticos (DNTs) constituintes do efluente Red Water. Também foi possível elucidar o mecanismo de degradação dos DNTs, observando a significativa relação do percentual de degradação com a atividade de enzimas oxidases, especialmente as peroxidases e Mn-peroxidases.

Similarmente, Levin e colaboradores (2016) obtiveram em sua pesquisa 98,4% de remoção de 4-nitrophenol (70 mg L⁻¹ solução aquosa) através do fungo *Trametes versicolor* (cepa BAFC 2234) em 4 dias de tratamento; onde a linhagem de fungo produziu lacase como a principal enzima ligninolítica, seguida de Mn-peroxidases (MnP) e peroxidases versáteis (VP). Segundo os autores, MnP e VP presentes no fungo, conseguiram degradar o 4-nitrophenol de maneira eficiente e segura, reduzindo significativamente a sua fitotoxicidade.

Anasomye et al. (2015) em pesquisas visando a biorremediação do TNT utilizando fungos pertencentes as linhagens *Gymnopilus luteofolius*, *Phanerochaete velutina* e *Kuehneromyces mutabilis*, apontaram os mesmos como capazes de produzir altas quantidades da enzima manganês peroxidases, remediando assim, o TNT em solo contaminado. Segundo os autores, as linhagens de *P. velutina* conseguiram degradar 80% do TNT em menos de 2,5 meses, sendo essas, utilizadas posteriormente, em estudos de maior escala de solos contaminados. Ademais, Lacases e Manganês peroxidases foram encontradas como enzimas proeminentes na degradação de TNT em todas as linhagens, consideradas, portanto, as principalmente enzimas de fungos, capazes de catalisar a biorremediação de compostos nitroaromáticos. Estudos envolvendo os fungos do gênero *Phanerochaete*, *Trichoderma*, *Gymnopilus* e *Kuehneromyces*, objetivando a degradação de nitroaromáticos, também foram realizados por Allothman et al., 2020 e Kong et al., 2015.

6. Biorremediação de nitroaromáticos por bactérias

Ainda no campo da microbiologia, pesquisas envolvendo a biorremediação por bactérias aeróbicas e anaeróbicas obtiveram resultados positivos na degradação de explosivos; sendo as linhagens bacterianas pertencentes ao gênero *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus*, *Achromobacter*, *Enterobacter*, *Rhodococcus*, *Klebsiella*, *Clostridium*, *Methanococcus* e *Desulfovibrio* as mais efetivas na degradação do TNT (MAKSIMOVA et al., 2018).

De acordo com Bilal e colaboradores (2021) as linhagens microbianas anaeróbicas de *Desulfovibrio* sp. e *Clostridium* sp. conseguem utilizar os nitroaromáticos como única fonte de carbono e nitrogênio na produção de energia, mesmo sob condições ambientais extremas; mineralizando o TNT e 2,4,6-triaminotolueno (TAT). Já as linhagens de *Geobacter* sp. KT17 e *Thauera aromática* KT9 foram comprovadas como degradadoras do 2-cloro-4-nitroanilina em condições anaeróbicas, onde a taxa de degradação do 2-cloro-4-nitroanilina foi melhorada na presença da *Geobacter* sp. em cultura mista (*Geobacter* sp. KT17 e *Thauera aromática* KT9). Conforme os autores, o aumento da degradação foi alcançado devido aos efeitos sinérgicos da cultura mista (Duc, 2019). De outra maneira, Farsi e colaboradores (2021) comprovaram em seus

estudos que a linhagem *Enterococcus thailandicus* RF isolada das águas da costa do Mar Vermelho apresentou a capacidade de degradar o 2,4,6-trinitrofenol (TNP) (FARSI, et al. 2021).

Estudos realizados por Zhang e colaboradores (2019) em solo contaminado com NACs e sob cultivo de milho, comprovaram que a linhagem de *Pseudomonas monteilli* PN1 conseguiu remover o p-nitrofenol (PNP) do solo; favorecendo o crescimento do milho (*Zea mays* L.) após o tratamento (ZHANG, et al. 2019). Além disso, utilizando-se técnicas de engenharia genética, Jing Xu e colaboradores (2021) determinaram que a linhagem da bactéria *Escherichia coli* BL21-AI conseguiu degradar completamente o PNP.

Outra importante enzima observada nos processos de biodegradação e biorremediação de nitroaromáticos é a nitrorredutase. Em estudos recentes, foi possível observar a capacidade de bactérias da linhagem *Cupriavidus* a3 de degradar compostos moni-toluenos (2NT, 3NT e 4NT) e o ácido nitrobenzóico (2NBA) mediante a enzima nitrorredutase, convertendo o grupamento nitro em grupo amino (TIWARI et al. 2020).

Além dessas, as bactérias pertencentes a *Geobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphilococcus*, *Achromobacter*, *Enterobacter*, *Rhodococcus*, *Klebsiella*, *Clostridium*, *Methanococcus*, *Desulfovibrio*, *Rhodoferas*, *Acetobacterium*, *Thiobacillus*, *Truepera*, *Pandoraea*, *Hyphomicrobium*, *Lautropia* e *Shweanella* também conseguiram realizar a biorremediação de compostos nitroaromáticos (MAJEWSKA et al., 2021; NAWAZ et al., 2021; LU et al., 2021).

7. Biorremediação de nitroaromáticos por plantas

Outra possível solução para biorremediação *ex situ* é a fitorremediação, a qual explora a habilidade de vegetais de remover os poluentes de solos contaminados. A principal limitação desse método é a toxicidade do contaminante, onde o tratamento só é possível se a toxicidade não for um fator limitante para a espécie candidata. A absorção dos poluentes e ação dos metabólitos dependem da locomoção do contaminante do solo para zona de influência próxima às raízes para que ocorra a fitorremediação, o que exige uma boa solubilidade dos resíduos tóxicos (AGUERO, 2019).

De acordo com Zhu et al. (2018) realizaram estudos com um sistema de fitorremediação utilizando plantas do gênero *Arabidopsis thaliana*, onde foi realizada tanto a degradação utilizando plantas selvagens, quanto com plantas geneticamente modificadas as quais apresentavam a superexpressão do NAD(P)H-flavin nitroreductase (NFSB) das bactérias *Sulfurimonas denitrificans* DSM1251, obtiveram como resultados, que a espécie geneticamente modificada teve uma maior atividade da nitroreductase e que as plantas mostraram uma maior tolerância ao TNT as plantas transgênicas também apresentaram maior capacidade de remoção o TNT do meio e maior eficiência nas transformações.

Similarmente, Zhang et al. (2018) empregou modificações genéticas em *western wheatgrass (Pascopyrum smithii)* visando a remoção e desintoxicação de RDX e TNT. Segundo os autores, as plantas transformadas removeram de forma significativa o RDX e exibiram uma retenção menor em seus tecidos quando comparadas com espécies selvagens, as plantas também demonstraram maior resistência a toxicidade do TNT, bem como, maior taxa de desintoxicar do nitroaromático quando comparado às espécies selvagens.

8. Considerações finais

O uso da biorremediação por fungos, bactérias e plantas demonstrou-se uma ferramenta robusta no tratamento de diversas categorias de xenobióticos nitroaromáticos; pois, apresentam um baixo custo, processos relativamente simples, bem como, alta eficiência na remoção dos nitroaromáticos; com exceção de quando há aplicação de técnicas de melhoramento genético onde há custos elevados e maior complexidade.

Tendo em vista, os perigos e impactos ambientais oriundos do uso e descarte indiscriminado de NACs, faz-se necessário o contínuo aprimoramento de técnicas de biorremediação, de modo a minimizar os custos e assim, tornar a prática acessível e aplicável mesmo em países de baixa renda ou de difícil acesso.

9. Referências

AGUERO, Stephanie; RAPHAËL, Terreux. Degradation of High Energy Materials Using Biological Reduction: A Rational Way to Reach Bioremediation. **International Journal of Molecular Sciences**. v. 20, n. 22, p. 5556, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20225556>

ALOTHMAN, A. Zeid *et al.* Bioremediation of Explosive TNT by *Trichoderma viride*. **Molecules**. v. 25. 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25061393>

ANASONYE, Festus *et al.* Bioremediation of TNT contaminated soil with fungi under laboratory and pilot-scale conditions. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 105, p. 7-12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.08.003>

BAGHERI, Ahmad Reza; ARAMESH, Nahal; BILAL, Muhammad. New frontiers and prospects of metal-organic frameworks for removal, determination, and sensing of pesticides. **Environmental Research**, v. 194, p. 110654, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110654>.

BILAL, Muhammad *et al.* Environmental occurrence, toxicity concerns, and remediation of recalcitrant nitroaromatic compounds. **Journal of Environmental Management**, v. 291, p. 112685, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112685>.

CAI, Zhengqing *et al.* Reduction of nitrobenzene in aqueous and soil phases using carboxymethyl cellulose stabilized zero-valent iron nanoparticles. **Chemical Engineering Journal**, v. 332, p. 227-236, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.066>.

CALZA, Paola *et al.* Solar driven production of toxic halogenated and nitroaromatic compounds in natural seawater. **Science of the Total Environment** v. 398, p. 196–202, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.023>

CHEN, Ming *et al.* Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols, and heavy metals by composting: applications, microbes, and future research needs. **Biotechnology Advances**. v. 33, p. 745–755, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003>

CHENG, Min *et al.* Advantages and challenges of Tween 80 surfactant-enhanced technologies for the remediation of soils contaminated with hydrophobic organic compounds. **Chemical Engineering Journal**, v. 314, p. 98–113, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.135>

CHENG, Min *et al.* Degradation of atrazine by a novel Fenton-like process and assessment of the influence on the treated soil. **Journal of Hazardous Materials** v. 312, p. 184–191, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.033>

CHENG, Min *et al.* Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. **Chemical Engineering Journal** v. 284, p. 582–598, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.001>

CHOW, Ka Shing; HUANG, Hilda; YU, Jian Zhen. Quantification of nitroaromatic compounds in atmospheric fine particulate matter in Hong Kong over 3 years:

Field measurement evidence for secondary formation derived from biomass burning emissions. **Environmental Chemistry**. v. 13. 2015. <https://doi.org/10.1071/EN15174>

EHRlich, John *et al.* *Streptomyces venezuelae*, n. sp., the source of Chloromycetin. **Journal of Bacteriology**, v. 56, n. 4, p. 467-477, 1948. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC518608/pdf/jbacter00650-0105.pdf> (Acesso em 16 de Janeiro de 2022).

FARSI, M. Reem *et al.* Biodegradation of picnic acid (2,4,6-trinitrophenol, TNP) by free and immobilized marine *Enterococcus thailandicus* isolated from the Red Sea, Saudi Arabia. **The Egyptian Journal of Aquatic Research**. v. 47, p.307-312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.05.002>

HAO, Yuxing *et al.* *In vivo* toxicity of nitroaromatic compounds in rats: QSTR modeling and interspecies toxicity relationship with mice. **Journal of Hazardous Materials**, v. 399, p. 122981, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122981>.

HUANG, Danlian *et al.* Immobilization of cd in river sediments by sodium alginate modified nanoscale zerovalent iron: impact on enzyme activities and microbial community diversity. **Water Research** v. 106, p. 15–25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.050>

ISHAG, Abd Elaziz Sulieman Ahmed *et al.* Biodegradation of endosulfan and pendimethalin by three strains of bacteria isolated from pesticides-polluted soils in Sudan. **Applied Biological Chemistry** v. 60, p. 287–297, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13765-017-0281-0>

JIANG, Xinbai *et al.* Efficient nitro reduction and dechlorination of 2,4-dinitrochlorobenzene through the integration of bioelectrochemical systems into up-flow anaerobic sludge blanket: a comprehensive study, **Water Research** v. 88, p. 257–265, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.023>

KARIKALAN, Natarajan *et al.* Electrocatalytic reduction of nitroaromatic compounds by activated graphite sheets in the presence of atmospheric oxygen molecules. **Journal of Catalysis**. v. 356, p. 43-52, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.09.012>

KIM, Hyoun-Young, BENNETT, George, SONG, Hong-Gyu. Degradation of 2, 4, 6-trinitrotoluene by *Klebsiella* sp. isolated from activated sludge. **Biotechnology Letters**. v. 24, p. 2023–2028, 2002. <https://doi.org/10.1023/a:1021127201608>

KIST, P. Cristiane *et al.* Biodegradation of nitroaromatic compounds in Red Water by white-rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *floridae*. **Revista Ambiente e Água**. v. 15, n. 6, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2594>

KONG, Mingming *et al.* Enzyme catalytic nitration of aromatic compounds. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 73-74, p. 34-43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2015.03.008>

KUMAR, Akshay et al. Toxic brain injury with nitrobenzene poisoning. *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, v. 7, n. 3, p. 207, 2017. https://doi.org/10.4103/ijabmr.IJABMR_271_16.

KUMAR, Pawan et al. Metal-organic framework for sorptive/catalytic removal and sensing applications against nitroaromatic compounds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 84, p. 87-95, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.024>.

LEITH, Larry; TELLIARD, William. Priority pollutants. I. A perspective views. *Environmental Science and Technology* v. 13, p. 416–423, 1979. <https://doi.org/10.1021/es60152a601>

LEVIN, Laura et al. Degradation of 4-nitrophenol by the white-rot polypore *Trametes versicolor*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. v 107. p. 174-179, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.023>

LIN, Hong-Yan; YU Chang-Ping; CHEN Zuliang. Aerobic and anaerobic biodegradation of TNT by newly isolated *Bacillus mycoides*. *Ecological Engineering*, v. 52, p. 270-277, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.11.004>

LIU, Jiangyong et al. Intriguing hierarchical Co@NC micro flowers in situ assembled by nanoneedles: Towards enhanced reduction of nitroaromatic compounds via interfacial synergistic catalysis. *Journal of Hazardous Materials*. v. 403. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123987>

LIU, Jiangyong et al. Silver nanoparticles-decorated-Co₃O₄ porous sheets as efficient catalysts for the liquid-phase hydrogenation reduction of p-Nitrophenol. *Journal of Colloid and Interface Science*. v. 551, p. 261-269. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.05.018>

LU, Chunying et al. Emissions of fine particulate nitrated phenols from residential coal combustion in China. *Atmospheric Environment*. v. 203, p. 10-17. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.047>.

MAJEWSKA, Marta et al. Toxicity of selected airborne nitrophenols on eukaryotic cell membrane models. *Chemosphere* v. 266, p. 128996, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128996>

MAKSIMOVA, Yuliya, MAKSIMOV, Aleksandr, DEMAKOV, V. Biotechnological approaches to the bioremediation of an environment polluted with trinitrotoluene. *Applied Biochemistry and Microbiology* v. 54, p. 767–779, 2018. <https://doi.org/10.1134/S0003683818080045>

NAWAZ, Muhammed Imran et al. Experimental study of nitrobenzene degradation in water by strong ionization dielectric barrier discharge. *Environmental Technology* v. 42, n. 5, p. 789–800, 2021. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1645740>

PARTE, Satish; MOHEKAR, Ashokrao; KHARAT, A. Microbial degradation of pesticide: a review. **African Journal of Microbiology Research** v. 11, p. 992–1012. <https://doi.org/10.5897/AJMR2016.8402>

PUROHIT, Vandana; BASU, K. Ashis. Mutagenicity of nitroaromatic compounds. **Chemical Research in Toxicology** v. 13, p. 673–692, 2000. <https://doi.org/10.1021/tx000002x>

SHAER, Ibrahim *et al.* Biodegradation of pendimethalin by three strains of bacteria isolated from pesticides polluted soils. Univ Khartoum **Journal of Agricultural Science**. v. 21, p. 233–252, 2013.

SMITH, M. Robert *et al.* Chloromycetin: biological studies. **Journal of Bacteriology** v. 55, p. 425–448, 1948. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC518460/pdf/jbacter00643-0154.pdf>.

TAYA, Payal *et al.* Design of a novel FRET-based fluorescent chemosensor and their application for highly sensitive detection of nitroaromatics. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 255, p. 2628–2634, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.073>

TEICH, Monique *et al.* Contributions of nitrated aromatic compounds to the light absorption of water-soluble and particulate brown carbon in different atmospheric environments in Germany and China, **Atmospheric Chemistry and Physics** v. 17, p. 1653–1672, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-1653-2017>.

TINKOV, V. Oleg *et al.* Computational assessment of environmental hazards of nitroaromatic compounds: influence of the type and position of aromatic ring substituent on toxicity. **Structural Chemistry** v. 27, p. 191–198, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11224-015-0715-4>.

TIWARI, Jyoti *et al.* Environmental persistence, hazard, and mitigation challenges of nitroaromatic compounds. **Environmental Science Pollution Research**, v. 26, 28650–28667, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06043-8>.

TIWARI, Jyoti *et al.* Remediation of different nitroaromatic pollutants by a promising agent of *Cupriavidus* sp. strain a3. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 205, p. 111138, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111138>

VIONE, Davide *et al.* Aqueous atmospheric chemistry: formation of 2,4-dinitrophenol upon nitration of 2-nitrophenol and 4-nitrophenol in solution. **Environmental Science and Technology** v. 39, p. 7921–7931. 199, 2005a. <https://doi.org/10.1021/es050824m>

VIONE, Davide *et al.* Nitration and photonitration of naphthalene in aqueous systems. **Environmental Science and Technology** v. 39, p. 1101–1110, 2005b. <https://doi.org/10.1021/es048855p>

WANG, Junhuan *et al.* Degradation characteristics and metabolic pathway of 4-nitrophenol by a halotolerant bacterium *Arthrobacter* sp. CN2, **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 98, n. 2, 2015. <https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1115507>

WANG, Liwei *et al.* Observations of fine particulate nitrated phenols in four sites in northern China: concentrations, source apportionment, and secondary formation, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.18, p. 4349–4359, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-4349-2018>.

WANG, Lu *et al.* Rapid degradation of sulfamethoxazole and the further transformation of 3-amino-5-methylisoxazole in a microbial fuel cell. **Water Research** v. 88, p. 322–328, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.030>

WANG, Xinfeng *et al.* Emissions of fine particulate nitrated phenols from the burning of five common types of biomass. **Environmental Pollution**. v. 230, p. 405-41, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.072>.

WANG, Yifan *et al.* The elucidation of the biodegradation of nitrobenzene and p-nitrophenol of nitroreductase from Antarctic psychrophile *Psychrobacter* sp. ANT206 under low temperature. **Journal of Hazardous Materials**. v. 413, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125377>

WANG, Yujue *et al.* The formation of nitro-aromatic compounds under high NO_x and anthropogenic VOC conditions in urban Beijing, China, **Atmospheric Chemistry and Physics** v. 19, p. 7649–7665, 2019. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7649-2019>.

XIAO, Xiang *et al.* Anaerobic reduction of high-polarity nitroaromatic compounds by electrochemically active bacteria: Roles of Mtr respiratory pathway, molecular polarity, mediator, and membrane permeability. **Environmental Pollution**. v. 268. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115943>

XU, Jing *et al.* Biodegradation of p-nitrophenol by engineered strain. **AMB Express**. v. 11, n. 1, p.1-8, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01284-8>

XU, Wenjie *et al.* Biodegradation of dinitrotoluene sulfonates and other nitroaromatic compounds by *Pseudomonas* sp. X5 isolated from TNT red water contaminated soil. **J. Clean. Prod.** v. 214, p. 782–790, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.025>

YUAN, Ying *et al.* Compost-derived humic acids as regulators for reductive degradation of nitrobenzene. **Journal of Hazardous Materials** v. 339, p. 378–384, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.047>

ZHANG, Long *et al.* Genetic Modification of Western Wheatgrass (*Pascopyrum Smithii*) for the Phytoremediation of RDX and TNT." **Planta**. v. 249, n. 4, p. 1007-1015. 2018. <https://doi-org.ez79.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00425-018-3057-9>

ZHANG, Jingxin, ZHANG, Yaobin, QUAN, Xie. Bio-electrochemical enhancement of anaerobic reduction of nitrobenzene and its effects on microbial community, **Biochemical Engineering Journal**, v. 94, p. 85–91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.11.018>.

ZHANG, Yuqin *et al.* *Pseudomonas monteilii* PN1: a great potential P-nitrophenol degrader with plant growth-promoting traits under drought and saline-alkali stresses, **Biotechnology Letters** v. 41, p. 801-811, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10529-019-02692-4>

ZHOU, Junyu *et al.* Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep25088>.

ZHOU, Xinwei *et al.* Probing extracellular reduction mechanisms of *Bacillus subtilis* and *Escherichia coli* with nitroaromatic compounds. **Science of The Total Environment**. v. 724, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138291>

ZHU, Bo *et al.* Degradation of trinitrotoluene by transgenic nitroreductase in Arabidopsis plants. **Plant Soil Environment** v. 64, p. 379–385, 2018. <https://doi.org/10.17221/655/2017-PSE>

Autores

Luís Felipe Oliva dos Santos¹, Graciela Beatris Lopes², Gustavo Henrique de Souza²

1. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental. Universidade Estadual de Maringá. E-mail: pg403633@uem.br; luisfelipe.oliva11@gmail.com
2. Pós-graduação em Bioquímica. Universidade Estadual de Maringá. E-mail: pg55122@uem.br; bealopes.s@hotmail.com, pg403653@uem.br; gustavo.hsouza99@gmail.com