

Artigo

Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados

Rodrigues, A. C. D.; Santos, A. M.;* Santos, F. S.; Pereira, A. C. C.;
Sobrinho, N. M. B. A.

Rev. Virtual Quim., 2016, 8 (1), 262-276. Data de publicação na Web: 7 de janeiro de 2016

<http://rvq.sbq.org.br>

Response Mechanisms of Plants to Heavy Metal Pollution: Possibility of Using Macrophytes for Remediation of Contaminated Aquatic Environments

Abstract: Water contamination by heavy metals is a growing concern among public officials and citizens due to their high potential toxicity to living things and the environment. Macrophytes have been studied for use in a cleaning up polluted water bodies, due to their favorable characteristics. The various species can respond differently to environments contaminated with heavy metals. They can be sensitive, showing symptoms of toxicity and intolerant of high contamination levels, or tolerant, using extra or intracellular mechanisms to allow them to grow in the presence of these contaminants. In this review, we present the main mechanisms used by plants in response to contamination by heavy metals.

Keywords: Phytoremediation; pollution; tolerance.

Resumo

A contaminação da água por metais pesados vem despertando muita preocupação dos governantes e de toda população devido ao seu alto potencial de toxicidade a todos os seres vivos e ao ambiente. As macrófitas aquáticas têm sido estudadas para serem utilizadas como alternativas de recuperação desse ambiente, uma vez que possuem características favoráveis a esse processo. As diferentes espécies existentes podem responder de formas diversas ao ambiente contaminado por metais pesados, podendo ser sensíveis, exibindo sintomas de toxicidade e não tolerando elevadas concentrações de contaminação; ou tolerantes, utilizando mecanismos extra ou intracelulares que possibilitem seu crescimento na presença desses contaminantes. Nesta revisão nós apresentamos os principais mecanismos utilizados pelas plantas como resposta à contaminação por metais pesados.

Palavras-chave: Fitorremediação; poluição; tolerância.

* Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Campus Seropédica, CEP 23897-000, Seropédica-RJ, Brasil.

✉ amarques@ufrj.br; amarques.ufrj@gmail.com

DOI: [10.5935/1984-6835.20160017](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20160017)

Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados

Ana Carolina D. Rodrigues,^a André M. dos Santos,^{b,*} Fabiana S. dos Santos,^c Ana Carolina C. Pereira,^d Nelson M. B. A. Sobrinho^a

^a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária-PPGCTIA, Campus Seropédica, CEP 23890-000, Seropédica-RJ, Brasil.

^b Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Laboratório de Bioquímica de Plantas, Campus Seropédica, CEP 23897-000, Seropédica-RJ, Brasil.

^c Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia de Agronegócios, Campus da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, CEP 27255-250, Volta Redonda-RJ, Brasil.

^d Centro Universitário de Volta Redonda, Departamento de Ciências de Tecnologia e Engenharias, Campus Olezio Galotti, CEP 27240-560, Volta Redonda-RJ, Brasil.

* amarques@ufrj.br; amarques.ufrj@gmail.com

Recebido em 3 de janeiro de 2016. Aceito para publicação em 3 de janeiro de 2016

1. Introdução

2. Respostas das plantas à contaminação por metais pesados

2.1. Sensibilidade e sintomas de toxicidade de metais pesados nas plantas

2.2. Tolerância das plantas a metais pesados

3. Respostas de algumas macrófitas a contaminação por Cádmi

3.1. Aguapé (*Eichhornia crassipes*)

3.2. Orelha de onça (*Salvinia minimos*)

3.3. Musgo d'água (*Azolla caroliniana*)

3.4. Alface d'água (*Pistia stratiotes*)

4. Conclusões

1. Introdução

Cada vez mais a contaminação ambiental por metais pesados tem se tornado tema de debates e pesquisas que buscam o seu

controle e/ou descontaminação, uma vez que essa contaminação pode prejudicar a saúde e desenvolvimento dos seres vivos e o equilíbrio do ecossistema como um todo.¹ A contaminação da água é uma das mais preocupantes por ser um insumo indispensável não só aos organismos vivos, mas também à produção e ao desenvolvimento social e econômico.² Com o crescente avanço tecnológico, esse recurso vem sendo alvo constante de efluentes das diversas atividades antrópicas, o que desperta a busca por métodos de prevenção e descontaminação.¹

A fitorremediação é uma técnica que vem sendo utilizada em projetos de biorremediação de ambientes aquáticos contaminados por metais pesados. Nessa técnica podem ser utilizadas plantas aquáticas, as macrófitas, aproveitando suas características fisiológicas para retirar, inertizar ou conter os poluentes dispersos no ambiente.³ A forma de fitorremediação mais estudada é a fitoextração, onde as plantas extraem os metais pesados (ou outros poluentes) e os acumulam nos tecidos. A remoção desses contaminantes do meio se dá com a colheita das plantas, podendo as mesmas serem utilizadas posteriormente para fins não alimentares, como produção de energia.⁴ As plantas que se destacam nesse processo são chamadas de hiperacumuladoras de metais pesados. Elas são capazes de concentrar níveis elevados de metais em sua biomassa, que seriam tóxicos a outras espécies cultivadas sob condições idênticas.⁵

A rizofiltração é a técnica de fitorremediação que utiliza plantas aquáticas para remediação de água contaminada, principalmente com metais pesados. Difere da fitoextração, porque o acúmulo de contaminantes tende a ser preferencialmente nas raízes das plantas aquáticas. As características das macrófitas, como fácil cultivo e elevada taxa de crescimento, possibilitam sua utilização em estratégias de fitorremediação devido ao elevado potencial fitoextrator de metais pesados.^{3,6} Alguns estudos já confirmaram a

tolerância de algumas espécies aquáticas a metais pesados, com altas taxas de acúmulo em relação a sua biomassa,^{3,7} dentre elas destacam-se o Aguapé (*Eichhornia crassipes*) e Orelha de onça (*Salvinia auriculata*).¹

2. Respostas das plantas à contaminação por metais pesados

As plantas desenvolvidas em um ambiente contaminado por metais pesados podem responder de diferentes formas a essa contaminação. Elas podem ser sensíveis, exibindo sintomas de toxicidade, ou tolerantes, desenvolvendo mecanismos que evitam os efeitos deletérios desses elementos e consequentemente permitindo o melhor desenvolvimento das plantas.⁸

2.1. Sensibilidade e sintomas de toxicidade de metais pesados nas plantas

Alguns metais são essenciais ao crescimento dos vegetais, pois fazem parte da constituição de enzimas e proteínas (zinco e cobre, por exemplo), e podem se tornar tóxicos as plantas quando em elevadas concentrações. Outros metais não possuem função conhecida no metabolismo vegetal, induzindo sintomas de toxicidade em concentrações mínimas. Esses sintomas observados podem ser devido a uma variedade de interações a nível celular/molecular.⁹

As plantas sensíveis à contaminação por metais pesados podem ser utilizadas como indicadoras desse tipo de contaminação, uma vez que exibem sintomas de toxicidade, denunciando a presença desses elementos no ambiente.

A membrana plasmática é a primeira estrutura viva que pode ter sua função afetada pelos metais pesados, uma vez que é a primeira a estabelecer uma relação com esses contaminantes. Diversos estudos demonstraram aumento nos

extravasamentos das células por danos causados à membrana plasmática pelos metais tóxicos.¹⁰ Esses danos podem ser consequência de diferentes processos, como as ligações com grupos sulfidríla das proteínas, peroxidação dos lipídeos, inativação de proteínas chave e mudanças na composição e fluidez da membrana lipídica.¹¹⁻¹² Uma diminuição na fosforilação também pode ocorrer devido ao aumento da permeabilidade a prótons na membrana mitocondrial interna.¹²

Ao entrar na célula, um dos primeiros danos fisiológicos causados pelos metais pesados é a inativação de diversas enzimas citoplasmáticas⁸. Isso pode resultar da ligação dos metais a grupos sulfidríla de proteínas, levando a inibição de suas funções normais, rompimento de sua estrutura ou deslocamento de um elemento essencial que acarretará em sintomas de deficiência.¹²

Outro importante efeito tóxico causado pelos metais pesados está relacionado ao estresse oxidativo. O excesso desses metais pode levar a formação de radicais livres e espécies reativas de oxigênio (ERO), como hidroxila (OH⁻), ânion superóxido (O₂⁻) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂), que em níveis elevados geram desequilíbrio e consequentemente o estresse.⁹ Vários estudos comprovam que esse estresse é capaz de causar alterações em proteínas nucleares e DNA, provocando a deterioração oxidativa das macromoléculas biológicas e a peroxidação de lipídeos das membranas.¹²⁻¹³ O estresse oxidativo também pode ser explicado pela redução da capacidade antioxidante, uma vez que os níveis de glutathiona reduzida (GSH - um dos mais importantes antioxidantes dos vegetais) são diminuídos pela síntese de fitoquelatinas (induzida pelos altos níveis de metais pesados) e por sua ação quelante desses elementos.¹⁴

A fotossíntese das plantas exposta a contaminação por metais pesados é também comprometida, uma vez que esses elementos podem reduzir os níveis de clorofila e carotenoides, pela inativação das enzimas

responsáveis pela biossíntese desses pigmentos. Vários autores confirmaram a sensibilidade do aparato fotossintético aos metais pesados.¹⁴⁻¹⁵ Efeitos prejudiciais na cadeia transportadora de elétrons também são relatados, assim como inativação das enzimas do ciclo de Calvin e redução da condutância estomática.¹⁶

Alguns autores relataram também a interferência dos metais pesados no metabolismo de macro e micronutrientes,¹² comprometendo consequentemente o crescimento das plantas.¹⁷

2.2. Tolerância das plantas a metais pesados

Como visto anteriormente, os metais pesados interferem prejudicialmente no crescimento, distribuição e no ciclo biológico das espécies vegetais, o que faz necessário a busca por plantas que apresentem mecanismos de tolerância para utilização em áreas contaminadas e sirvam de alternativa para remediação ambiental.¹⁸

A tolerância a metais pesados é detectada quando uma planta é capaz de sobreviver em um ambiente com elevadas concentrações desses elementos, onde outras plantas não conseguiriam devido aos seus efeitos tóxicos.⁹ Essa capacidade pode ser adquirida ao longo do tempo, com o desenvolvimento de mecanismos de adaptação às condições estressantes do meio. Uma mesma planta pode apresentar diferentes formas de suportar a contaminação, sendo que as respostas podem variar de acordo com as características de cada espécie, com os elementos causadores do estresse e as condições específicas da área.¹⁸

As plantas podem estabelecer estratégias intra ou extracelulares para inibirem os efeitos prejudiciais dos metais pesados em seus tecidos (Figura 1). Os mecanismos extracelulares (Figura 2) compreendem, entre outros, os exsudados radiculares, que alteram o pH da rizosfera e

consequentemente a especiação dos metais, favorecendo a ligação dos íons nas paredes das células. Incluem também o papel das micorrizas, da parede celular e membrana plasmática que podem, além de reduzir a absorção (exclusão), estimular o bombeamento dos metais presentes no citossol.^{4,9}

Os mecanismos intracelulares (Figura 4) estão associados a mecanismos potenciais de

reparação de proteínas comprometidas pelos efeitos da contaminação, quelação dos metais por ligantes de alta afinidade e o transporte e compartimentalização desses elementos no vacúolo, que os distancia das atividades metabólicas das células.^{4,9,18} Esses diferentes processos estão apresentados resumidamente na Figura 1 e serão discutidos com mais detalhes adiante.

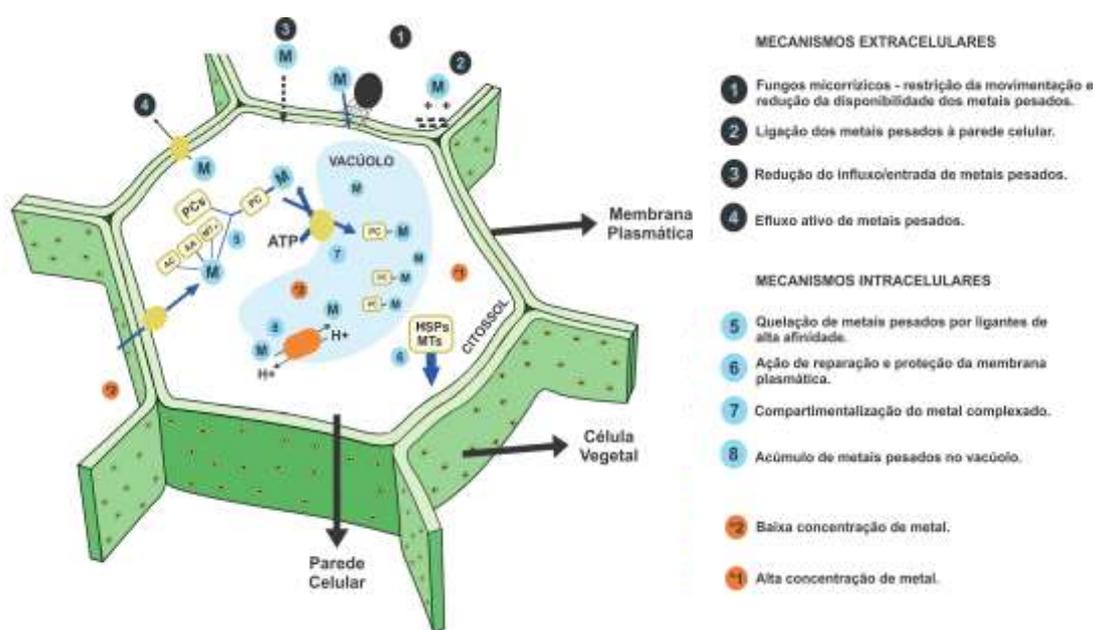


Figura 1. Resumo dos mecanismos celulares com potencial para a detoxificação de metais pesados conferindo tolerância à essa contaminação em plantas superiores

2.2.1. Mecanismos extracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

A Figura 2 mostra os principais mecanismos extracelulares que conferem às plantas tolerância aos metais pesados.

Mecanismos de imobilização de metais

Os fungos micorrízicos, mesmo não sendo sempre considerados como um dos mecanismos de tolerância a metais pesados, contribuem para a redução da disponibilidade desses elementos e de seus

efeitos tóxicos.¹³ Esses fungos favorecem a tolerância das plantas aos metais pesados, atuando como agentes de proteção das mesmas. As estratégias empregadas por eles para o aumento dessa tolerância ainda não foram suficientemente elucidadas, mas, alguns autores confirmaram o seu potencial de retenção dos metais no micélio e redução da disponibilidade para absorção, o que pode ser variável de acordo com o metal e as espécies fúngicas.¹⁹ Alguns estudos também apontaram o aumento da absorção de metais pesados pelas plantas associadas aos fungos micorrízicos, favorecendo a fitorremediação, o que pode ocorrer pelas diferenças de espécies e do hospedeiro.^{13,19-20} Os mecanismos usados pelos fungos para tolerar

os metais pesados são similares aos utilizados pelos vegetais e incluem ligação a materiais extracelulares (como exsudados fúngicos) e compartimentalização no vacúolo.⁹

A parede celular das células das raízes mantém um contato direto com os metais pesados e sua ligação com eles tem sido estudada como uma das formas de tolerância a esse contaminante pelas plantas.⁹ Essa ligação é explicada pela presença de microporos em sua estrutura, que são carregados negativamente devido à presença de grupos carboxílicos, e funcionam como locais de ligação e troca de cátions di e polivalentes (forma de muitos metais pesados).⁴ Um aumento na espessura da parede das células dos tecidos radiculares foi observado como resposta à contaminação. Nesse caso, a planta aumenta sua capacidade de filtro, pois aumenta suas cargas negativas e protege os tecidos internos dos efeitos danosos dos metais pesados. Várias pesquisas apontam a endoderme e exoderme como as principais barreiras e locais de retenção dos metais pesados nas raízes das plantas, minimizando a translocação desses íons e favorecendo a tolerância a esse estresse.²¹

Mecanismos de exclusão de metais (prevenção)

Nas plantas exclusoras, a absorção dos metais pesados é restringida devido a retenção pelas raízes, o que pode evitar a dispersão da contaminação no meio e

prevenir o aparecimento de seus efeitos tóxicos, principalmente no aparato fotossintético na parte aérea das plantas.²¹

Os exsudatos radiculares podem assumir uma variedade de papéis, uma vez que possuem uma gama de compostos em sua constituição, sendo os ácidos orgânicos os mais relatados para tolerância a metais. Eles podem complexar os cátions metálicos e diminuir a atividade extracelular desses elementos, reduzindo sua disponibilidade e aumentando a resistência das plantas a esses contaminantes.^{9,18}

A membrana plasmática pode ter suas funções rapidamente comprometidas pelos efeitos tóxicos dos metais pesados (explicado anteriormente). No entanto, membranas de plantas tolerantes são capazes de prevenir e reduzir sua entrada na célula ou excluir os metais que já foram absorvidos.⁸⁻⁹ A entrada dos íons metálicos nas células é mediada por proteínas de membranas (transportadores) e a tolerância aos metais é explicada pela supressão do sistema de transporte, reduzindo a absorção.⁹

O efluxo ativo de metais pesados das células é a base da tolerância a esses contaminantes em bactérias. Muitos autores sugerem a existência desse mecanismo também nas plantas, devido às várias classes de transportadores de metais existentes, os quais podem estar envolvidos na homeostase em geral e conseqüentemente na tolerância aos metais pesados.^{9,22,23} Mais evidências sobre o funcionamento desse mecanismo em plantas ainda devem ser avaliadas.

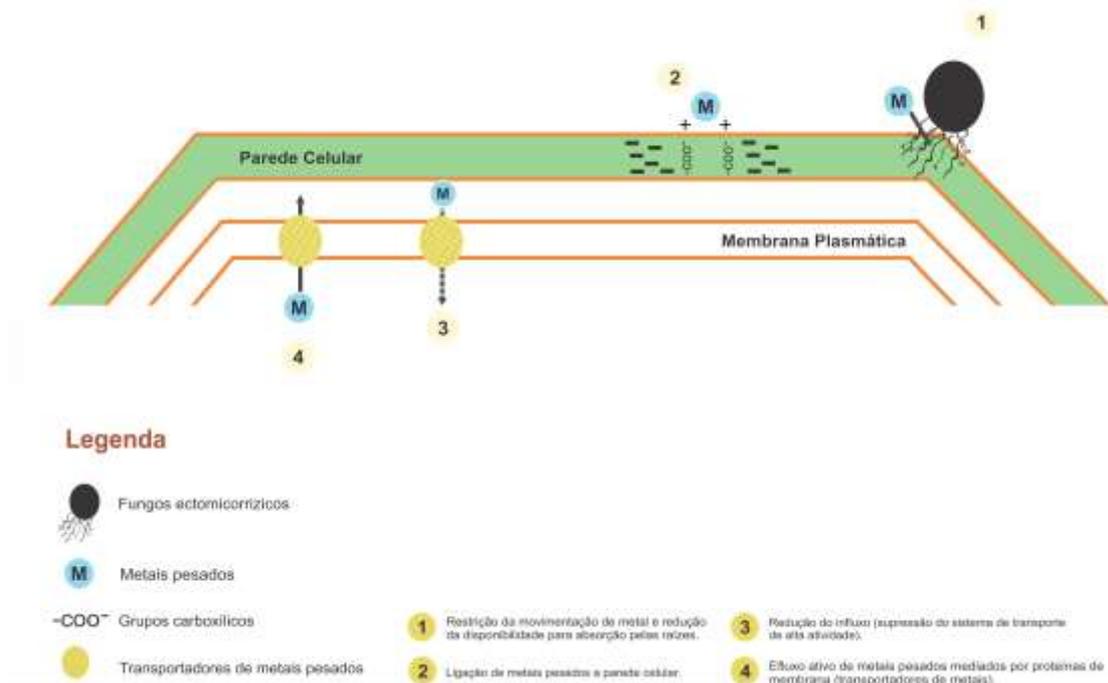


Figura 2. Esquema ilustrando os mecanismos extracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

2.2.2. Mecanismos intracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

Na desintoxicação, os metais são absorvidos e armazenados nas plantas, porém, ocorrem processos fisiológicos que permitem essa acumulação sem o desenvolvimento de sintomas de toxicidade e comprometimento do crescimento e desenvolvimento do vegetal. Situações extremas ocorrem quando os níveis de absorção e acúmulo desses elementos são muito elevados, o que acontece nas plantas chamadas hiperacumuladoras.²⁴ A Figura 4 mostra, os principais mecanismos intracelulares que conferem às plantas tolerância aos metais pesados, que serão discutidos a seguir.

Mecanismo de reparação de danos

As proteínas de choque térmico (HSPs - "Heat shock proteins") podem ser encontradas em todos os organismos vivos, como resposta principalmente ao estresse

por temperatura. Contudo, sua expressão pode estar relacionada a outros estresses, como os causados por metais pesados, com papel na preservação da sobrevivência celular sob condições ambientais adversas.^{9,24} Vários relatos demonstraram também a atuação das proteínas de choque térmico na conservação e proteção das membranas plasmáticas contra os efeitos da contaminação, aumentando a tolerância das plantas a esses elementos²⁴⁻²⁶

Mecanismos de quelatção (complexação) de metais

A quelatção de metais pesados é um mecanismo muito importante de desintoxicação e tolerância a esses elementos, pois eles são envolvidos por ligantes de alta afinidade como aminoácidos, ácidos orgânicos e peptídeos como as fitoquelatinas e metalotioneínas.^{9,14} A ligação dos metais com esses quelantes contribui para a redução desses elementos no citossol, reduzindo sua reatividade, solubilidade e conseqüentemente o aparecimento de seus

efeitos tóxicos nas plantas.^{14,18}

As fitoquelatinas (Phytochelatin - PCs) são uma família de peptídeos tiólicos complexantes de metais, principalmente de cádmio (Cd), que têm um papel importante no processo de desintoxicação desses íons nas plantas. Sua síntese é ativada rapidamente na presença dos metais pesados, sendo enzimaticamente produzidas utilizando a glutatona (GSH) como substrato.¹⁴ Os metais quando complexados com as fitoquelatinas são incapazes de provocar danos às plantas, favorecendo assim sua tolerância.⁴ Estes peptídeos também são relacionados com outras funções importantes, incluindo a homeostase

essencial de metais, metabolismo do enxofre e até como antioxidantes, que igualmente podem favorecer o aumento da tolerância aos metais pesados.⁹ As fitoquelatinas formam seus complexos mais estáveis com Cd (Figura 3), pela sua elevada afinidade ao enxofre, porém não está relacionada somente com esse elemento. Estudos demonstram que os metais induzem a síntese de PC na seguinte ordem de afinidade Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Sb^{3+} , Ag^+ , Hg^{2+} , As^{5-} , Cu^+ , Sn^{2+} , Au^{3+} , Bi^{3+} .¹⁸

Após a complexação dos metais, o complexo fitoquelatina-metal é transportado ao vacúolo para ser armazenado e compartimentalizado.⁴

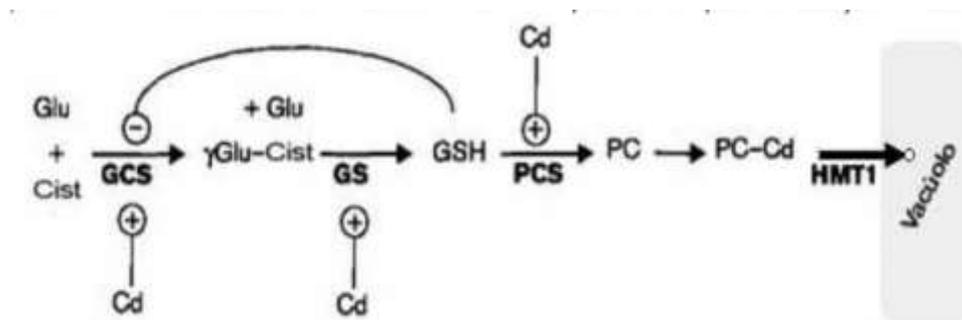


Figura 3. Representação da quelação de Cd e dos processos envolvidos na síntese de fitoquelatinas. Sinais negativos e positivos indicam a inativação ou ativação da atividade enzimática respectivamente. **Glu:** glutamato; **Cist:** cisteína; **GCS:** sintetase da γ - glutamil-cisteína; **GS:** sintetase da glutatona; **GSH:** glutatona reduzida; **Cd:** cádmio; **PCS:** sintase da fitoquelatina; **PC:** fitoquelatina; **PC-Cd:** complexo fitoquelatina-cádmio; **HMT1:** transportador vacuolar. Fonte: Adaptado de GUIMARÃES *et al.* (2008)¹²

As metalotioneínas (metallothioneins - MTs) são uma família de proteínas ricas em cisteína, produzidas com a finalidade de se ligar a metais pesados e prevenir assim seus sintomas prejudiciais. Elas constituem, assim como as fitoquelatinas, um importante mecanismo de resistência a essa contaminação.²⁷ As MTs podem ser encontradas em animais, microorganismos e nas plantas, sendo induzidas pela presença de metais pesados, principalmente cobre, zinco e cádmio.^{9,28-29} Alternativamente, outros papéis podem estar relacionados com as metalotioneínas, como antioxidantes ou reparação de membranas.⁹

Ácidos orgânicos, como ácido cítrico e málico, e aminoácidos, como histidina, também são apontados como ligantes de metais pesados, reduzindo sua toxicidade e exercendo papel significativo na tolerância e desintoxicação desses elementos.^{9,18,31}

Mecanismo de compartimentalização de metais

A compartimentalização de metais está associada ao mecanismo de quelação, de modo que, após eles serem ligados com os

quelantes inibindo seus efeitos tóxicos, são transportados para estruturas subcelulares como o vacúolo, para sua acumulação e consequente redução desses contaminantes no citossol.¹⁸ Por esses motivos a compartimentalização de metais pesados no vacúolo tem sido apontada por diversos autores como um dos mecanismos mais importantes para tolerância a esses elementos^{9,31}

Vários relatos já comprovaram o acúmulo de Cd unido a PCs no vacúolo celular, através do sistema de transporte do tonoplasto,

sugerindo que o tonoplasto exerce um papel importante nessa tolerância, com a superexpressão de transportadores nas membranas de plantas tolerantes.⁹ Outros autores,¹⁴ também relataram estudos que identificaram os transportadores associados a esse mecanismo de tolerância em algumas plantas, assim como seus genes codificadores, e explica que o transporte pelo tonoplasto não está somente associado a presença dos quelantes, mas também do íon isolado.

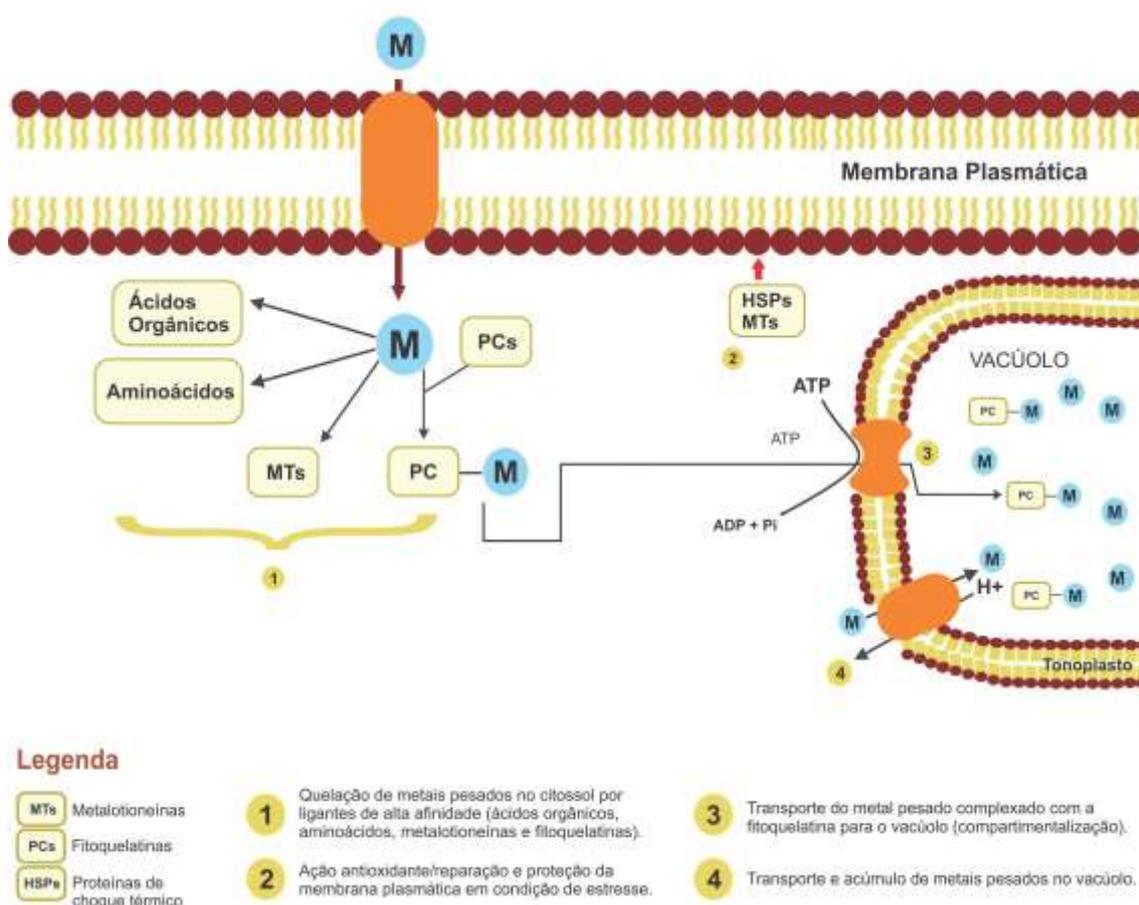


Figura 4. Esquema ilustrando os mecanismos intracelulares de tolerância das plantas aos metais pesados

3. Respostas de algumas macrófitas a contaminação por Cádmio

3.1. Aguapé (*Eichhornia crassipes*)

A capacidade do aguapé (*Eichhornia crassipes*) (Figura 5) em tolerar ambientes contaminados por metais pesados é atribuída a sua habilidade em sofrer modificações na sua fisiologia e anatomia, que levam a adaptação ao ambiente estressante.²⁹

Em estudo com aguapé, mais de 88% de todo Cd absorvido pela macrófita foi acumulado nas raízes, mesmo estando as folhas em contato com a solução contaminada. Os autores observaram que em baixas concentrações desse elemento nenhum sintoma de dano é apresentado pela planta, mas em elevadas concentrações percebe-se um acúmulo de antocianinas nos pecíolos e estolões, escurecimento nas raízes e redução na emissão de novas raízes. Estes sintomas estão relacionados ao rompimento da membrana, primeiro alvo da fitotoxicidade do Cd, e deposição de material opaco ao longo da lamela média.¹



Figura 5. Aguapé, *Eichhornia crassipes*. (Fonte: Pott, V. J.; Pott, A. Potencial de uso de plantas aquáticas na despoluição da água. In. Documentos 133, Embrapa Gado de Corte, 2002. 25 p. Foto: Arnildo Pott)

O cádmio encontrado nas raízes dessas plantas está associado às cargas negativas das paredes celulares, evitando sua translocação para a parte aérea e possíveis danos a esse órgão. A fração absorvida também sofre resistência para translocação devido a sua complexação nas raízes, principalmente por fitoquelatinas.¹

O aguapé apresentou elevadas concentrações de tióis solúveis mesmo sendo cultivado em solução contaminada por cádmio, demonstrando o potencial da planta em conter esse elemento e evitar seus sintomas de toxicidade.¹ Essa planta também apresentou níveis elevados de cisteína, o que

favorece a produção de fitoquelatinas e contribui, conseqüentemente, com a maior tolerância ao metal. A redução nos níveis de glutatona nessas plantas também sugere a síntese das fitoquelatinas e a maior tolerância ao Cd.¹

Em outro estudo, os autores confirmaram as observações anteriores e apontaram que o aumento da concentração de Cd, elevou seu acúmulo pela planta e reduziu a produção de massa seca das raízes, devido ao seu maior contato com a contaminação.³⁰

Em estudo recente, o autor observou que o aguapé manteve sua taxa fotossintética quando cultivada na presença de Cd e

relacionou esse fato com o aumento da atividade das enzimas do metabolismo antioxidativo nas folhas, induzidas pelo aumento desse elemento na solução. A atuação das enzimas pode ter protegido as estruturas dos cloroplastos, evitando a peroxidação da membrana, o que permitiu a manutenção da fotossíntese. Concentrações muito elevadas dessa contaminação reduziram a atuação das enzimas e consequentemente as taxas fotossintéticas.²⁹

Mudanças na anatomia, como aumento na densidade estomática, da espessura do mesófilo foliar e parênquima esponjoso, também foram observadas em aguapé cultivado na presença de Cd, o que favorece a fotossíntese pela maior capacidade de entrada e retenção de CO₂ e consequentemente o desenvolvimento da planta e tolerância à contaminação.²⁹ Elevadas taxas de fotossíntese podem incrementar a reprodução vegetativa, devido à produção de energia e esqueletos de carbono, elevar o crescimento populacional e assim aumentar os agentes de descontaminação.

3.2. Orelha de onça (*Salvinia minimos*)

A *Salvinia* (Figura 6) possui uma significativa assimilação de água e nutrientes



Figura 6. Orelha-de-onça, *Salvinia minimos*. (Fonte: Pott, V. J.; Pott, A; *Potencial de uso de plantas aquáticas na despoluição da água*. Documentos 133, Embrapa Gado de Corte, 2002. Foto: Arnildo Pott)

pelas folhas, uma vez que elas naturalmente mantém sua face adaxial em contato com a solução.¹ Mesmo com essa absorção foliar, os teores de Cd são superiores nas raízes, que estão submergidas na solução, indicando a ligação desse elemento às cargas negativas da parede celular desse órgão, ao invés da transferência para parte aérea. Alguns autores apontam que o Cd absorvido em *Salvinia* é complexado com fitoquelatinas e compartimentalizado nos vacúolos das células das raízes.^{1,31}

3.3. Musgo d'água (*Azolla caroliniana*)

A *Azolla* (Figura 7) apresentou um acúmulo de Cd semelhante em suas raízes e parte aérea, sendo que na parte aérea esse acúmulo levou ao desenvolvimento de pequenos grãos escuros, principalmente na parede celular do feixe do xilema, contendo elevados teores de Cd e também de fósforo e cálcio.³² Essas estruturas favorecem a tolerância a esse metal e inibição de seus efeitos tóxicos no citossol. O mesmo mecanismo foi relatado para outras plantas.³³

Foi observada alta mobilidade de Cd em *Azolla*, evidenciando localização intracelular desse metal, com sua translocação da raiz para parte aérea.



Figura 7. Musgo d'água (*Azolla caroliniana*). (Fonte: SANTOS, C. L; *Acúmulo e toxidez de manganês em macrófitas aquáticas flutuantes livres*. p. 57, 2009)

3.4. Alface d'água (*Pistia stratiotes*)

Pouco se sabe sobre o potencial fitorremediador de metais pesados da *Pistia stratiotes*. Porém, de acordo com algumas de suas características pode-se supor a sua pré-disposição.

A *Pistia stratiotes* L. (Araceae) é uma planta aquática, pantropical, flutuante, conhecida vulgarmente como: alface-de-água, erva-de-Santa Luzia, golfo, lentilha-da-água, mururé-pajé entre outros (Figura 8). Seu potencial para fitoextração de Cd e outros metais pesados, com armazenamento de concentrações elevadas

desses elementos em seus tecidos foi confirmado recentemente.²⁹ A tolerância dessa planta quando cultivada em ambiente estressante foi devido ao aumento da sua biomassa, mesmo sendo cultivada na presença de contaminantes.³⁴ A Alface-d'água foi citada como uma das macrófitas eficientes na despoluição de reservatórios aquáticos contaminados.³⁵

Estudos mais detalhados sobre essa macrófita são requeridos, a fim de confirmar o potencial indicado por suas características, conhecer as respostas dessa planta a contaminação por metais pesados, para subsidiar sua indicação ou não em projetos de fitorremediação desses contaminantes.



Figura 8. Alface d'água (*Pistia stratiotes*). (Fonte: Pott, V. J.; Pott, A; *Potencial de uso de plantas aquáticas na despoluição da água*. Documentos 133, Embrapa Gado de Corte, 2002. Foto: Arnildo Pott)

4. Conclusões

As macrófitas aquáticas têm sido associadas em todo mundo com seu potencial para fitorremediação de corpos hídricos contaminados, principalmente, por metais pesados. Isso se deve ao seu rápido crescimento, alta absorção dos elementos disponíveis e elevada produção de biomassa.

Para tolerar e sobreviver ao ambiente estressante essas plantas apresentam diferentes mecanismos fisiológicos, intra e extracelulares, que permitem o seu bom desenvolvimento mesmo em condições hostis. Muitos estudos têm demonstrado a possibilidade de uso dessas macrófitas, principalmente Aguapé (*Eichhornia crassipes*), Orelha de onça (*Savinia minima*) e Musgo d'água (*Azolla caroliniana*), em estratégias de descontaminação de corpos hídricos contaminados com metais pesados, pois acumulam concentrações elevadas de metais pesados em seus tecidos. Por outro lado, macrófitas como a Alface-d'água (*Pistia stratiotes*) ainda necessitam ser melhor estudadas, podendo ser também promissora na descontaminação de reservatórios aquáticos contaminados por esses elementos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ pelo apoio financeiro às pesquisas e também a Ana Carolina Moura (Designer, Setor de Comunicação e Marketing do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA) pela confecção das figuras utilizadas neste artigo.

Referências Bibliográficas

- ¹ Oliveira, J. A.; Cambraia, J.; Cano, M. A. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e salvinia. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* **2001**, *13*, 329. [CrossRef]
- ² de Freitas, V. P. Águas: aspectos jurídicos e ambientais, 3. ed. Curitiba: Juruá, 2008. 306 p. [Link]
- ³ Pio, M.; Souza, K.; Santana, G. Ability of *Lemna aquinoctialis* for removing heavy metals from wastewater. *Acta Amazon* **2013**, *43*, 203. [CrossRef]
- ⁴ Mirza, N.; Mahmood, Q.; Maroof, S.M., Pervez, A.; Sultan, S. Plants as Useful Vectors to Reduce Environmental Toxic Arsenic Content. *The Scientific World Journal* **2014**, *2014*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- ⁵ Romeiro, S.; Lagoa, A. M. M. A.; Furlani, P. R.; Abreu, C. A.; Pereira, B. F. F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. *Bragantia* **2007**, *66*, 327. [CrossRef]
- ⁶ Hadad, H. R.; Maine, M.; Bonetto, C. A. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere* **2006**, *63*, 1744. [CrossRef]
- ⁷ Rai, P. K. Heavy metal phyto remediation from aquatic ecosystems with special reference to macrophytes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **2009**, *39*, 697. [CrossRef]
- ⁸ Lasat, M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality* **2002**, *31*, 109. [CrossRef]
- ⁹ Hall, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* **2002**, *53*, 1. [CrossRef]
- ¹⁰ Quartacci M. F.; Cosi, E.; Navari-Izzo, F. Lipids and NADPH-dependent superoxide production in plasma membrane vesicles from roots of wheat grown under copper deficiency or excess. *Journal of Experimental Botany* **2001**, *52*, 77. [CrossRef] [PubMed]

- ¹¹ Romero-Puertas, M. C.; Corpas, F. J.; Sandalio, L. M.; Lettieri, M.; Rodríguez-Serrano, M.; Del Río, L. A.; Palma, J. M. Glutathione reductase from pea leaves: response to abiotic stress and characterization of the peroxisomal isozyme. *New Phytologist* **2006**, *170*, 43. [PubMed]
- ¹² Guimarães, M. D. A.; Santana, T. A.; Silva, E. V.; Zenzen, I. L.; Loureiro, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. *Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas* **2008**, *2*, 58. [Link]
- ¹³ de Souza, L. A.; de Andrade, S. A. L.; de Souza, S. C. R.; Schiavinato, M. A. Tolerância e potencial fitorremediador de *Stizolobium aterrimum* associada ao fungo micorrízico arbuscular *Glomus etunicatum* em solo contaminado por chumbo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2011**, *35*, 1441. [CrossRef]
- ¹⁴ dos Santos, F. S.; do Amaral Sobrinho, N. M. B.; Mazur, N.; Garbisu, C.; Barrutia, O.; Becerril, J. M. Resposta antioxidante, formação de fitoquelatinas e composição de pigmentos fotoprotetores em *Brachiaria decumbens* Stapf submetida à contaminação com Cd e Zn. *Química Nova* **2011**, *34*, 16. [CrossRef]
- ¹⁵ Souza, V.L.; Silva, D.D.C.; Santana, K.B.; Mielke, M.S.; Almeida, A.F.; Mangabeira, P.A.O.; Rocha, E.A. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. *Acta Botanica Brasílica* **2009**, *23*, 343. [CrossRef]
- ¹⁶ Küpper, H.; Parameswaran, A.; Leitenmaier, B.; Trtílek, M.; Setlík, I. Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation to cadmium stress in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist* **2007**, *175*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- ¹⁷ Sá, T. C. L. L.; Marques, M.; Soares, A. M.; Gomes, M. P.; Martins, G. Respostas Fisiológicas e Anatômicas de Plantas Jovens de Eucalipto Expostas ao Cádmio. *Revista Árvore* **2011**, *35*, 997. [CrossRef]
- ¹⁸ Souza, E. P. D.; Silva, I. D. F. D.; Ferreira, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. *Current Agricultural Science and Technology* **2013**, *17*, 167. [Link]
- ¹⁹ Cabral, L.; Siqueira, J. O.; Soares, C. R.F. S.; Pinto, J. E. B. P. Retenção de metais pesados em micélio de fungos micorrízicos arbusculares. *Química Nova* **2010**, *33*, 25. [CrossRef]
- ²⁰ Alexandre, J. R.; Oliveira, M. L.; Santos, T.; Canton, G. C.; Conceição, J.; Eutrópio, F. J.; Ramos, A. C. Zinco e ferro: de micronutrientes a contaminantes do solo. *Natureza on line* **2012**, *10*, 23. [Link]
- ²¹ Gomes, M. P.; Marques, T. C. L. L. D.; Nogueira, M. D. O. G.; Silva, G. H.; Castro, E. M. D.; Soares, Â. M. Effects of tailings from zinc industry in the anatomy and growth of young plants of *Salix humboldtiana* Willd:(willow). *Hoehnea* **2011**, *38*, 135. [CrossRef]
- ²² Schenberg, A. C. G. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados* **2010**, *24*, 07. [CrossRef]
- ²³ Williams, L. E.; Pittman, J. K.; Hall, J. L. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta* **2000**, *1465*, 104. [CrossRef]
- ²⁴ Castro, S. V.; Lobo, C. H.; Figueiredo, J.R.; Rodrigues, A. P. R. Proteínas de choque termico hsp 70: Estrutura e atuação em resposta ao estresse celular. *Acta Veterinaria Brasílica* **2014**, *7*, 261. [Link]
- ²⁵ Marques, M.; Aguiar, C. R. C.; da Silva, J. J. L. S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2011**, *35*, 1. [CrossRef]
- ²⁶ Neumann, D.; Lichtenberger, O.; Günther, D.; Tschiersch, K.; Nover, L. Heat-shock proteins induce heavy-metal tolerance in higher plants. *Planta* **1994**, *194*, 360. [CrossRef]
- ²⁷ Andrezza, R.; Camargo, F. A. D. O.; Antonioli, Z.I.; Quadro, M.S.; Barcelos, A.A. Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. *Revista de Ciências Agrárias* **2013**, *36*, 127. [Link]
- ²⁸ Follí-Pereira, M. S.; Meira-Haddad, L. S.; Bazzolli, D. M. S.; Kasuya, M. C. M. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2012**, *36*, 1663. [CrossRef]

- ²⁹ Pereira, F. J. (2014). Características anatômicas e fisiológicas de aguapé e índice de fitorremediação de alface d'água cultivados na presença de arsênio, cádmio e chumbo. [\[Link\]](#)
- ³⁰ Gonçalves Júnior, A. C.; Lindino, C. A.; da Rosa, M.F.; Bariccatti, R.; Gomes, G.D. Remoção de metais pesados tóxicos cádmio, chumbo e cromo em biofertilizante suíno utilizando macrófita aquática (*Eichornia crassipes*) como bioindicador. *Acta Scientiarum Technology* **2008**, *30*, 9. [\[CrossRef\]](#)
- ³¹ Zenk, M. H. Heavy metal detoxification in higher plants - a review. *Gene* **1996**, *179*, 21. [\[CrossRef\]](#)
- ³² Gaur, J. P.; Noraho, N.; Chauhan, Y. S. Relationship between heavy metal accumulation and toxicity in *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid. and *Azolla pinnata* R. *Br. Aquatic Botany* **1994**, *49*, 183. [\[CrossRef\]](#)
- ³³ Sela, M.; Tel-Or, E.; Fritz, E.; Huttermann, A. Localization and toxic effects of cadmium, copper, and uranium in *Azolla*. *Plant Physiology* **1988**, *88*, 30. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁴ Kurscheidt, E. C. D. S. (2013). Avaliação da fitorremediação como alternativa de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário utilizando macrófitas. [\[Link\]](#)
- ³⁵ Pott, V. J.; Pott, A. (2002). Potencial de uso de plantas aquáticas na despoluição da água. Embrapa Gado de corte. [\[Link\]](#)