



## MANEJO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS

ALÍRIO COROMOTO DABOIN MALDONADO, BENO WENDLING

---

Universidade Federal de Uberlândia

---

### RESUMO

A contaminação por metais pesados é atualmente um dos maiores problemas ambientais, principalmente em áreas onde há influência das atividades humanas. Os metais pesados são de ocorrência natural, nos ecossistemas aquáticos são provenientes da solubilização das rochas e sua lixiviação no solo. Alguns metais são necessários para a sobrevivência de grande variedade de espécies animais e vegetais, outros não, porque presentes em altas concentrações podem vir a causar desequilíbrios na natureza. Às atividades antrópicas é atribuída grande parte dos problemas causados por metais pesados em ambientes aquáticos. Esta revisão visa apresentar alternativas para evitar a contaminação dos ecossistemas aquáticos ou a remoção destes contaminantes. Neste sentido, métodos preventivos são necessários para evitar medidas de remediação de custo alto, pois são realizadas quando o passivo ambiental já ocorreu. Entre os métodos preventivos enquadram-se os tratamentos de efluentes industriais, tratamento das águas pluviais, tratamento de resíduos sólidos, tratamento de esgotos domésticos, manejo adequado de agroquímicos e manejo adequado do solo na agricultura. Já a remediação ou recuperação pode ser realizada por processos físicos, químicos e biológicos, que podem ser utilizados para remover, reter, mobilizar ou decompor determinados contaminantes presentes no sistema aquático. Fisicamente, a remoção por plantas e de sedimentos tem sido a mais adotada. Recursos químicos são pouco usados em ambientes aquáticos, mediante a não especificidade da maioria dos agentes conhecidos. E por fim, temos a remediação biológica ou biorremediação, que utiliza microorganismos ou espécies vegetais (fitoremediação) para mitigar problemas de contaminação de metais pesados.

**Palavras-chave:** metais pesados, ecossistemas aquáticos, manejo, remediação.

## MANAGEMENT OF POLLUTED AQUATIC ECOSYSTEMS BY HEAVY METALS

### ABSTRACT

Contamination by heavy metals is now one of the major environmental problems, especially in areas where there is influence of human activities. Heavy metals are naturally occurring in aquatic ecosystems are from the solubilization of rock and soil leaching. Some metals are necessary for survival in variety of animal and plant species, others do not, because in high concentrations may cause the imbalance in nature. To human activities is largely attributed the problems caused by heavy metals in aquatic environments. This review aims to present alternatives to avoid contamination of aquatic ecosystems or the removal of these contaminants. Accordingly, methods are necessary preventive measures to avoid the high cost of remediation, they are held when the environmental liability occurs. Among the fall-prevention methods is the treatment of industrial effluents, rain water treatment, and solid waste management, treatment of domestic sewage, appropriate management of chemicals and appropriate soil management in agriculture. Already the remediation or restoration can be accomplished by physical, chemical and biological agents that can be used to remove, retain, deploy or break a contaminant present in the aquatic system. Physically, the removal of plants and sediments has been the most used. Chemical resources are little used in aquatic environments by non-specificity of most agents known. Finally, we have the biological remediation or bioremediation, which uses microorganisms or plants (phytoremediation) to mitigate problems of contamination of heavy metals.

**Keywords:** heavy metals, aquatic ecosystems, management, remediation

## INTRODUÇÃO

A expressão “metal pesado”, comumente utilizado para designar metais classificados como poluentes, na verdade aplica-se a elementos que têm densidade maior que  $5 \text{ g cm}^{-3}$ , ou que possuem número atômico maior que 20 (Casarini *et al.*, 2001; Alloway, 1995).

Os metais pesados, ou também chamados elementos-traço, são elementos químicos que ocorrem na natureza, quase sempre em pequenas concentrações. Na atualidade o termo elementos-traço tem tido mais destaque, por também englobar elementos como o Arsênio, que causam problemas ambientais, mas que não se enquadra como metal pesado.

Alguns elementos-traço ou metais pesados, como Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, Co, Mo e B são essenciais aos seres vivos, e possuem importante papel no metabolismo dos ambientes aquáticos, pois participam de processos fisiológicos, como é o caso da fotossíntese, cadeia respiratória e fixação de nitrogênio. Por outro lado, Hg, Pb, Cd, Ag, Cr, Ni e Sn, não tem função biológica conhecida, e são quase sempre tóxicos para determinados organismos. Mesmo aqueles que tem função biológica conhecida, podem apresentar toxicidade a determinados organismos, quando em condições apropriadas para tal (Esteves, 1998).

Em geral, as concentrações de metais pesados na água estão muito aquém dos padrões de qualidade estabelecidos. Por outro lado, a tendência dos metais pesados é de se aderirem aos sólidos em suspensão que por sua vez, sedimentam-se no fundo do corpo d'água, formando um manto de sedimentos, que funcionam como um dreno destes elementos (Esteves, 2002), mas que podem voltar para a solução entre os poros dos sedimentos ou mesmo voltar para a lâmina de água (Warren, 2001).

Os metais pesados, além de serem tóxicos são cumulativos no organismo e podem provocar diversos tipos de doenças no ser humano com a ingestão de pequenas doses, por períodos consideráveis, fato que faz com que as autoridades tenham reservado algumas horas para discutir mais sobre esse assunto (Dias *et al.*, 2001).

A contaminação por metais pesados é considerada atualmente como um dos maiores problemas ambientais, principalmente em áreas onde ocorre influência das atividades humanas. As fontes antrópicas desta contaminação por metais pesados pode ter sua origem

em fontes pontuais, não-pontuais e lineares. Segundo Meurer *et al* (2006) nas últimas décadas acentuou-se a preocupação quanto a contaminação e poluição do solo e conseqüentemente das águas superficiais e subterrâneas devido a grande expansão urbana e industrial.

A preocupação com a contaminação de ambientes aquáticos aumenta, principalmente, quando a água é usada para o consumo humano (Dores & De-Lamonica-Freire, 2001), e outros alimentos destes retirados, como peixes (Warren & Haack, 2001) e plantas aquáticas.

No entanto, são tidos como poluídos quando contém concentrações de determinado contaminante que chegam a afetar os componentes bióticos do ecossistema, comprometendo a funcionalidade e sustentabilidade do ecossistema, não sendo, portanto, um ambiente contaminado necessariamente poluído (Accioly & Siqueira, 2000).

Entender a dinâmica do comportamento de metais em águas continentais tem sido o principal enfoque da geoquímica ambiental durante várias décadas, e o interesse vem crescendo, na procura de alternativas reguladoras, mitigadores e remediativas para manejar corpos de água contaminados (Warren & Haack, 2001).

O objetivo desta revisão foi reunir informações sobre contaminação de metais pesados em ecossistemas aquáticos, bem como métodos utilizados para lidar com esse problema, englobando medidas preventivas e remediativas de despoluição.

## ORIGEM DOS METAIS PESADOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Os metais pesados podem estar presentes em solos, sedimentos e águas (Guilherme, 2002), podendo ser oriundos do intemperismo de rochas e transportados por erosão, pela atmosfera ou provenientes da atividade humana (Esteves, 1998; Jackson, 2002). O ciclo hidrológico está relacionado com a distribuição de energia solar na terra. Por meio da evaporação ocorre o transporte da água dos compartimentos hidrosfera e litosfera para atmosfera. Após a precipitação da água na forma de chuva ou neve, por infiltração no solo, ocorre a renovação das águas subterrâneas, ou lençol freático (recarga dos aquíferos) e essa água pode afluir em determinados pontos, formando as nascentes. A água é devolvida à atmosfera por efeito de eva-

poração direta dos sistemas aquáticos, solos e pela transpiração das folhas dos vegetais (Rocha et al., 2004)

### Ciclo geoquímico

Na verdade, todos os metais pesados encontrados na natureza são provenientes do ciclo geoquímico, o que muda é o fato do homem ter participação ou não no processo de contaminação. No entanto, quando se fala em ciclo geoquímico de metais, o fator determinante deste processo é o intemperismo de rochas ou minerais, presentes na crosta terrestre (Singh & Steinnes, 1994; Esteves, 1998). Mesmo assim, para que os contaminantes (metais pesados) alcancem os ambientes aquáticos é necessário o fator locomoção ou transporte (Casarini et al., 2001), que se dá via lixiviação, enxurrada (água e solo), ou via atmosfera (Singh & Steinnes, 1994), carregando consigo esses elementos até os ecossistemas aquáticos. Quando o ambiente aquático está sobre região naturalmente rica em determinados metais pesados, o fator transporte é menos importante, pois o contaminante faz parte do ambiente. Isso acontece muito em regiões de mineração de metais.

Dependendo do material de origem (tipo de rocha), os solos podem apresentar diferentes concentrações de metais pesados (Singh & Steinnes, 1994), determinando diferentes potenciais para contaminação de ecossistemas terrestres ou aquáticos.

### Deposição atmosférica

Trata-se de uma forma de contaminação que pode ser ou não influenciada antropicamente. De maneira geral, este tipo de poluição afeta com maior severidade áreas próximas de indústrias ou minas que trabalham com metais voláteis, mas pode vir a afetar áreas de até 1000 km de distância (Singh & Steinnes, 1994). Segundo esses autores, metais como Pb, Zn, Cd, As e Sb são passíveis de volatilização e conseqüente distribuição via atmosfera até que ocorra a deposição, tanto em áreas urbanas, solos e ambientes aquáticos.

### Contaminação antrópica

Denomina-se de contaminação antrópica quando o homem está contribuindo para o processo de contaminação. A contribuição humana pode se dar de diferentes maneiras, através de atividades industriais (liberação de efluentes contaminados com metais em ambientes aquáticos), atividades de mineração (minas

e garimpos), resíduos sólidos, aterros sanitários, efluentes domésticos e atividades agrícolas com o uso de fertilizantes e agroquímicos (Jackson, 2002).

Quanto ao uso de fertilizantes e corretivos, dificilmente problemas maiores devem aparecer, pois os solos são considerados tampões para evitar a liberação destes metais (Santos, 2001), mas quando, devido a aplicações contínuas de produtos contaminados, problemas ambientais podem surgir, pois estes metais podem atingir os ambientes aquáticos via ciclo hidrológico.

Mas o que oferece o maior potencial de risco aos ambientes aquáticos são as atividades industriais, mineração e resíduos urbanos. Estima-se que dos 2,9 milhões de toneladas de resíduos industriais perigosos gerados anualmente no Brasil, somente 600 mil toneladas recebem tratamento adequado, conforme a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento, Recuperação e Disposição de Resíduos Especiais (ABETRE). Os 78% restantes são depositados indevidamente em lixões, sem qualquer tipo de tratamento (Campanili, 2002).

## DINÂMICA DE METAIS PESADOS EM ÁGUAS E SEDIMENTOS

A dinâmica dos metais no solo é governada por uma série de reações químicas que ajudam a determinar os riscos ambientais a eles associados. As principais preocupações em relação à adição de metais aos solos são: entrada na cadeia alimentar, redução da produtividade agrícola devido a efeitos fitotóxicos, acúmulo no solo, alteração da atividade microbiana e posteriormente contaminação de recursos hídricos (Pires et al. 2006). Metais pesados em águas podem interagir com outros solutos, formando complexos e permanecendo na forma dissolvida. Também podem se unir às partículas inorgânicas e orgânicas através de adsorção e assimilação, ficando neste caso na forma particulada. Uma vez na forma particulada, os metais pesados podem precipitar ou sedimentar no fundo do corpo d'água. Para voltar à forma dissolvida deve acontecer a mineralização pela microbiota, dessorção ou ressolubilização (Guilherme et al., 2002).

Segundo Bridgen et al. (2000), o comportamento dos metais pesados uma vez lançados ao meio ambiente, especialmente a mobilidade e a toxicidade, é al-

tamente dependente do estado de oxidação e da estrutura da espécie metálica. Os impactos causados pela emissão desses metais ao meio ambiente dependem da quantidade e da forma em que os metais se encontram ao serem lançados. Vários desses metais têm o potencial de se bioacumular, incluindo o Cd, o Cr, o Pb, o Hg e o Zn (USPHS, 1998).

A contaminação de águas por metais pesados é facilitada pela dispersão de materiais particulados no ambiente, pois esses metais, uma vez no ar ou no solo, são facilmente carregados para os corpos d'água, onde podem ficar disponíveis ou retidos nos sedimentos (Esteves, 1998). As diferentes afinidades dos metais pesados pelas partículas sólidas, que sedimentam através da coluna de água, controlam o tempo de residência e a concentração desses na água (Stumm & Morgan, 1981). Neste sentido, o pH terá grande influência no destino dos metais pesados na coluna de água, onde os cátions metálicos, a concentração na forma dissolvida decresce com o aumento do pH, já que as formas precipitadas e adsorvidas são favorecidas em pHs mais básicos (Guilherme et al., 2002).

### Metais pesados e evolução de impactos ambientais

A capacidade do sedimento de acumular metais pesados faz deste compartimento um dos mais importantes na avaliação do nível de contaminação de ecossistemas aquáticos continentais (Gupta & Karuppiyah, 1996; Esteves, 1998; Baudo et al., 1999). Segundo estes, os sedimentos são importantes compartimentos de estoque para metais e podem ser também fonte, pois podem liberar novamente estes metais para a coluna d'água.

Por causa de sua habilidade de sequestrar metais, os sedimentos podem refletir a qualidade da água e registrar os efeitos das emissões antropogênicas. A importância do sedimento como indicador de poluição está no fato de que as concentrações de metais pesados que estes apresentam são as vezes, 1000 vezes superior que os da água, como é o caso do rio Elbe na Alemanha (Esteves, 1998), em outras palavras, a água vai renovando-se constantemente e os metais pesados adsorvidos nos sedimentos, acumulando-se.

Neste sentido, o estudo dos sedimentos pode fornecer importantes informações sobre a época em que houve a contaminação (Esteves, 1998). Isso é possível analisando a distribuição vertical da concentração de metais pesados em sedimentos. O estudo dos sedimen-

tos não só serve para descobrir a época da contaminação, mas também o início ou o local da fonte contaminadora (Esteves, 1998).

## MANEJO PREVENTIVO

O manejo preventivo em ecossistemas aquáticos engloba um conjunto de práticas adotadas para evitar a contaminação ou minimizar o impacto de atividades de alto potencial poluidor. Trata-se de prevenir problemas posteriores ou passivos (Jorgensen, 1980; Jackson, 2002), minimizando assim despesas com técnicas de controle e processo, em alguns casos, pouco eficientes, onerosas, demoradas, e iniciadas quando o problema ambiental está instalado.

### Tratamento de efluentes e resíduos

O tratamento de efluentes de indústrias de mineração ou resíduos destas atividades é de suma importância na preservação de ecossistemas aquáticos. Trata-se de uma medida preventiva, fundamental e obrigatória perante as leis atuais. Muitos materiais e métodos tem sido usados para remover metais pesados destes efluentes (Schneider et al., 1999), no entanto, muitos são caros, de difícil operacionalidade e ineficientes (Jackson, 2002).

Dependendo do metal em questão, Pedroso (2003) sugere várias tecnologias para minimizar o potencial poluidor de efluentes ou resíduos de atividades antrópicas, antes de serem lançados para o ambiente, de maneira a assegurar que as exigências legais sejam contempladas. Segundo este autor, as mais usadas são: **1 – Precipitação**, através do tratamento dos efluentes ou resíduos com agentes (hidróxidos de Na e Ca, carbonatos, sulfetos ou xantatos) capazes de provocar a precipitação dos metais presentes; **2 – Resinas de troca iônica** uso de resinas que são capazes de trocar íons presentes nos efluentes; **3 – Adsorção**; processo que utiliza materiais (material vegetal moído, alumina ativada, lignina ou argila, carvão ativado, etc.) que adsorvem grandes quantidades de metais dos efluentes contaminados. Tem merecido destaque o uso de material vegetal moído como alternativa para minimizar custos. Schneider et al. (1999) realizou um experimento para avaliar a possibilidade de utilizar um biosorvente obtido de uma planta macrófita (*Potamogeton lucens*). A planta foi colhida, seca, moída e usada na concen-

tração de 2 g/L de solução contendo 6,3 mg/L de Cu. Após uma hora de contato com o material vegetal, a solução continha somente 0,3 mg/L de Cu. Outras macrófitas, como *Eichhornia crassipes* e *Salvinia* sp, tiveram seu potencial adsorptivo avaliado por Schneider (1995). Gylien et al. (2002) avaliou com sucesso o potencial para remoção de metais pesados de efluentes industriais usando larvas de uma mosca (*Musca domestica*) como material absorvente; **4 – Construção de wetlands**, trata-se de uma espécie de lagoa artificial construída com o objetivo de remover metais pesados de efluentes contaminados (Wood & McAtamney, 1994; Esteves, 1998). O uso desta tecnologia pode envolver, dependendo do metal a ser removido, fatores físicos, químicos e biológicos (Wood & McAtamney, 1994), formando um ecossistema pantanoso. Entre os fatores químicos, temos a adição de agentes químicos para controlar o pH e Eh, regulando essas variáveis a ponto de permitirem a precipitação ou neutralização do contaminante. Já como fatores físicos, pode-se adicionar matéria orgânica, argila, solo orgânico, que além de atuarem como material adsorptivo proporcionam o aumento da população microbiana, que pode atuar na remoção de metais. Como fatores biológicos, temos o uso de plantas e microorganismos, que além de sintetizarem peptídeos e fitoquelatinas que atuam na precipitação ou neutralização, podem acumular os metais no seu tecido (Pedroso, 2003). Importante salientar que, quando o ambiente formado neste tipo de tratamento fica saturado com metais, principalmente as plantas e sedimentos devem ser removidos e tratados com tecnologias apropriadas.

### Controle da drenagem ácida em locais de mineração

A drenagem ácida em minas tem se mostrado outra fonte potencial de contaminação (Malik, 2003), afetando a dinâmica de metais nos ambientes aquáticos. Mello e Abrahão (1998), trabalhando com dejetos de mineração contendo minerais sulfetados, alertam para o exagerado abaixamento de pH causado por esses minerais em condições de aeração, proporcionando um ambiente muito ácido, tornando menos eficientes os mecanismos de adsorção e precipitação de metais, levando a um aumento geral no teor de metais nas águas de drenagem desses dejetos. Neste sentido, medidas devem ser tomadas para minimizar a liberação destes efluentes ácidos.

Segundo Cervantes et al. (2001), uma alga vermelha chamada *Cyanidium caldarium* é eficiente na remoção de Cu, Ni, Al e Cr da água proveniente da drenagem ácida de minas, ocorrendo a precipitação na superfície da célula, formado micro cristais. Essa alga também pode ser utilizada para remoção de metais em águas residuárias.

### Uso adequado de insumos na agricultura

A poluição decorrente do manejo do solo pode influir na qualidade da água por quatro vias (Holt, 2000): 1 – Emissão direta de agroquímicos durante a aplicação ou a disposição; 2 – Descargas de águas resultantes de irrigação ou drenagem; 3 – Lixiviação; 4 – Criadouros dentro ou fora dos mananciais (caranguejo, peixes, etc.) (Rocha et al, 2004). O emprego de fertilizantes sintéticos e defensivos vem crescendo geometricamente a taxas que giram em torno de uma sextuplicação a aproximadamente cada duas décadas, é importante reconhecer que o elevado uso destes insumos tem sido para assegurar os níveis de produção de alimentos e assim atender uma população que cresce a taxas elevadas. Entretanto, paralelamente crescem os riscos da acumulação ambiental até concentrações tóxicas destes insumos, se não é possível abolir seu uso torna-se necessário limitar seu uso, cortar desperdícios, e empregar técnicas de aplicação que reduzam os custos derivados de sua acumulação e propagação pela cadeia alimentar (Braga et al., 2002).

Em estudos realizados com quatorze produtos (calcários e formulados) por Amaral Sobrinho et al. (1992) relatam que no processo de manufatura, seja por razões econômicas ou por falta de uma fiscalização mais eficiente de níveis mínimos e qualidade desses produtos, geralmente encontram-se níveis preocupantes de metais pesados, seja facilmente liberados ou potencialmente presentes. Portanto, quando o local de aplicação dos insumos apresentar risco potencial, a escolha deve ser feita com critério.

Quando o solo ao qual são adicionados pesticidas ou fertilizantes carregando em sua bagagem metais pesados, não está contaminado, o perigo destes se perderem para ambientes aquáticos é menor, pois o poder tampão do solo ainda estará mais apto para reter estes elementos. Mas por outro lado, quando determinado solo já apresenta teores críticos de metais pesados, o problema torna-se sério, pois estes metais,

via lixiviação ou erosão, podem entrar nos ambientes aquáticos. Neste sentido, além de observar o conteúdo de metais pesados presentes nos pesticidas, corretivos e fertilizantes que são aplicados ao solo, é preciso também considerar o que já existe no solo, que pode ser herança do material de origem ou contaminações antrópicas anteriores.

### Redução da erosão superficial

Erosão superficial é o nome dado a perda de água e solo através da enxurrada. Esta água pode trazer elementos ou metais tóxicos em solução das lavouras para os corpos de água (Jakson, 2002). O solo que é perdido por esse processo também pode carregar esses elementos ou metais e vir a causar problemas nestes corpos d'água.

Práticas conservacionistas devem ser tomadas no sentido de reduzir essas perdas, evitando assim a contaminação do ambiente. Mesmo quando o solo que é perdido pela erosão não está contaminado por metais pesados, outros problemas, como o assoreamento dos rios e lagos, traz sérios inconvenientes.

## MANEJO REMEDIATIVO

Trata-se de uma intervenção no ecossistema aquático quando este já se encontra contaminado ou poluído (Jorgensen, 1980). Metais pesados podem estar presentes em ambientes aquáticos em diferentes formas, diferindo em sua toxicidade, mobilidade e biodisponibilidade (Warren & Haack, 2001). O entendimento destas diferentes formas e seu impacto no ambiente e para quem dele uso faz, é de extrema importância para entrar com medidas remediativas, ou mesmo preventivas.

Remediação é o nome dado a qualquer técnica usada com o objetivo de reduzir ou eliminar problemas ambientais já instalados. Vários são os métodos que podem ser usados, com bases biológicas, químicas e físicas. Os principais métodos de remediação são:

### Remediação biológica

Esta tecnologia explora os processos biológicos naturais que permitem que determinadas plantas ou microorganismos auxiliem na remediação de locais contaminados com metais (Pedroso, 2003). A remediação biológica pode ser dividida em dois itens, faci-

litando assim a compreensão, sendo eles, remediação com vegetação e com microorganismos.

### Remediação com vegetação

Mais conhecido como fitoremediação, por se tratar de um conjunto de tecnologias de limpeza ambiental que utiliza a vegetação para aumentar a dissipação ou estabilização de contaminantes ambientais. Segundo Souza (1999) a fitoremediação destaca-se pela capacidade de degradação dos contaminantes e da absorção de metais pesados pela rizosfera. De acordo com Gatliff (1994), a fitoremediação é indicada, pois o método não utiliza biofiltros nem projetos de biodegradação, mas sim a capacidade da própria natureza de inativar os contaminantes e assim se recompor. Metais com Kd baixo, como Cd, Zn e Ni, mostram que, quando em competição, são trocáveis e facilmente substituídos por Cr, Cu e Pb. Isto quer dizer que Cd, Ni e Zn são grandes problemas ambientais, e Cr, Cu e Pb estão entre os primeiros elementos a acumular nos tecidos das plantas que crescem em ambientes contaminados (Gomes et al., 2001).

Os principais mecanismos envolvidos na fitoremediação são: **1 – Volatilização**, este mecanismo tem sido proposto por pesquisadores como Salt et al. (1998) e Glick (2003), citando sua capacidade de destoxicação pela volatilização do Hg e Se. A planta absorve esses elementos a partir de ecossistemas contaminados, transformando-os em compostos passíveis de volatilização (Glick, 2003). Salt et al. (1998), citam vários autores que confirmaram a partir de experimentos realizados a volatilização de Se, entre eles, Evans (1968) trabalhando com *Astragalus racemosus*. A volatilização de compostos de Se é um importante mecanismo de resistência de algas marinhas (Salt et al., 1998). Segundo Salt et al. (1998), a fitovolatilização é uma consequência da fitoextração ou fitoacumulação, sendo neste caso a planta capaz de se livrar do contaminante. Os autores alertam a necessidade de considerar as implicações da volatilização, pois o contaminante continua ativo e pode parar em locais inadequados. A eficiência deste tipo de remediação é difícil de ser medido, justificando assim poucos trabalhos mais apurados sobre essa técnica; **2 – Rizofiltração**, trata-se da adsorção do poluente, principalmente metais, pelas raízes de plantas aquáticas presentes nos ambientes aquáticos (Salt et al. 1998; Glick, 2003). Uma planta para ter um bom potencial para remover metais da solução por esse

mecanismo deve ser de rápido crescimento radicular (Raskin et al., 1997), permitindo que uma grande quantidade de metais possam ser removidos; **3 – Bioacumulação**, essa tem sido a técnica de remediação mais amplamente estudada e usada (Salt et al 1998). Fitoacumulação ou fitoextração é definido como sendo o uso de plantas que possuem a capacidade de remover metais do ambiente e acumular no tecido vegetal (Salt et al 1998, Glick, 2003).

Enúmeras espécies vegetais já tiveram comprovada sua capacidade natural de acumular metais pesados (Glick, 2003). Estas plantas são chamadas de hiperacumuladoras de metais (Glick, 2003) e recebem esta denominação quando acumulam quantidades ente 0,1 e 1% de metais em relação à quantidade de massa seca produzida (Meagher, 2000). Glick (2003) ainda resalta que as espécies hiperacumuladoras devem ter a capacidade de conseguir sobreviver na presença de elevadas concentrações de metais, sem que isso lhes cause injúrias.

Visando o uso de espécies aquáticas com o objetivo de remediar a contaminação com metais, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos, entre eles destacam-se: Raí et al. (1995) que estudaram várias espécies de macrófitas, flutuantes, submersas e emergentes; Lewander *et al.* (1996) investigaram a concentração dos metais pesados no sistema água-sedimento-plantas usando duas espécies de macrófitas submersas, *Potamogeton pectinatus* e *Myriophyllum verticillatum*, Kānhkōnem *et al.* (1997) analisaram a concentração de metais pesados em diferentes partes de *Elodea canadensis*; e finalmente Mal *et al.* (2002) propõem o uso de *Elodea canadensis* como um biomonitor potencial devido a sua ampla distribuição e habilidade para acumular poluente em ecossistemas aquáticos.

Cardwell et al. (2002) analisaram Cd, Cu, Pb e Zn em plantas, verificando a acumulação destes metais em plantas aquáticas de rios urbanos contaminados no sul de Queensland, Austrália. Os autores enfatizam que *Typha sp.*, por exemplo, apresentou maior concentração de metais que o sedimento. Dos metais estudados o Zn aumentou sua acumulação na planta com o incremento da concentração do metal no sedimento.

Algumas algas também são eficientes para acumular metais (Pawlik-Skowronska, 2003). O autor avaliou a capacidade de dois ecotipos da alga verde chamada *Stigeoclonium tenuis* em acumular Zn, sendo que apenas uma delas foi boa acumuladora, apresentando

concentrações de Zn equivalentes a 8,13 ( $\pm$  0,34) mg/mg de matéria seca, para as condições em que trabalhou.

Juca (2006) comenta sob a utilização do solo para fazer o tratamento dos resíduos sólidos domiciliares e da necessidade em avançar na tecnologia de tratamento com aterros sanitários como por exemplo o “Sistema de Barreira Bioquímica” que consiste em um processo vantajoso para o tratamento de chorume, além de baixo custo de instalação, é resistente a variações de vazão, tem baixa frequência de manutenção, e não requer operador especializado.

Um dos principais objetivos do sistema bioquímico é a remoção de metais pesados, essa remoção e devida à absorção pelas plantas e a sorção de contaminantes do chorume pelo material da barreira.

Segundo Meurer (2006), além do conhecimento da distribuição dos metais pesados nas diferentes frações do solo, o conhecimento da atividade do metal livre em solução é fundamental para se inferir sobre seu comportamento no sistema solução-solo, na sua biodisponibilidade para as plantas e mobilidade no perfil do solo. Dessa forma, o estudo da especiação da solução do solo torna-se uma importante referência para a predição do potencial de mobilização dos metais no ambiente. Para essa finalidade vários programas de computadores estão disponíveis para modelar a solução e a fase sólida do solo, fornecendo informações de diverso tipo de reações e processos termodinâmicos, tais como: MINTEQ (Rodella, 2006).

### **Remediação com microorganismos**

A capacidade de diversos microorganismos na remediação via acumulação de uma ampla quantidade de espécies de metais pesados tem sido comprovada (Ledín, 2000 & Brierley, 1990). No entanto, a ação de microorganismos na remediação tem sido mais amplamente proposta para remediação de poluentes orgânicos (Guilherme, et al., 2002).

Vários são os modos ou mecanismos pelos quais os microorganismos podem atuar na remediação de metais (Ledín, 2000), sendo os principais: **1 – Transformação**, através de processos de redução (como por exemplo o Fe e o Mn), ou alcalinização (como por exemplo o Hg). A mobilidade e a toxicidade das formas dos metais depois da transformação difere significativamente da original; **2 – Acumulação**, pela sorção independentemente do metabolismo, ou absorção

intracelular dependente do metabolismo. Ambos os processos são passíveis de acontecer no mesmo microorganismo. Os termos sorção e absorção são usados quando o processo é passivo ou ativo, respectivamente. Em ambos os casos o destino do metal está relacionado a locomoção ou não dos microorganismos; 3 – **Mobilidade**, os microorganismos podem produzir ou liberar substâncias, como por exemplo compostos orgânicos, que podem afetar diretamente, ou indiretamente alterando o pH, a mobilidade dos metais, o Eh, etc.

Embora a utilização de microorganismos não seja muito utilizada a nível de ecossistemas aquáticos, alguns organismos já tiveram sua eficiência comprovada para este fim. Em uma revisão feita por Cervantes (2001) fica clara a possibilidade da utilização de microorganismos para redução do Cr(VI) para Cr(III), muito menos tóxico. Entre as bactérias com potencial redutor temos *Enterobacter cloacae* (anaeróbica), *Pseudomonas ambigua* (aeróbica), *Bacillus sp.* (aeróbica e anaeróbica), entre outras. Conforme o ambiente a ser remediado, deve-se optar por uma espécie aeróbica ou anaeróbica.

Malick (2003), em uma extensa revisão sobre o assunto de remediação com uso de microorganismos, cita enúmeras espécies que tiveram sua eficiência testada em laboratório: *Aspergillus niger* (Ni, Pb, Cu e Cr); *Enterobacter cloacae* (Cd, Ni e V); *Pseudomonas aeruginosa* (Pb, Cu e Cr); *Escherichia hermannii* (V e Ni); *Neurospora crassa* (Co); *Aspergillus terreus* (Cd); e *Sacchaomyces cerevisiae*, *Cacillus thurigiensis* e *Thiobacillus ferrooxidans* (Cu).

### Remediação química

Tecnologia que envolve basicamente, reações de oxidação/redução (Guilherme et al., 2002) e neutralização (Pedroso, 2003), convertendo quimicamente contaminantes perigosos em menos perigosos, não perigosos, mais estáveis, menos móveis ou inertes.

A alteração do estado de oxidação dos metais por oxidação ou redução pode destoxificar, precipitar ou solubilizar os metais (Pedroso, 2003). Os principais agentes oxidantes disponíveis no mercado e que podem ser utilizados são o permanganato de potássio, ozônio, peróxido de hidrogênio, hipoclorito e gás cloro (Guilherme et al. 2002 & Pedroso, 2003). Os principais agentes redutores utilizados são os metais alcalinos Na e K, dióxido de enxofre, sais de sulfito e sul-

fato ferroso (Pedroso, 2003). Já a neutralização química pode ser utilizada para precipitar sais metálicos insolúveis em água contaminada ou como preparação para redução\oxidação química. Essa precipitação pode ser induzida pela elevação do pH com adição de hidróxido de Na, Ca ou Mg, que fornecem íons hidróxido que vão reagir com os metais pesados dissolvidos, formando partículas sólidas ou precipitados (Pedroso, 2003).

Esta tecnologia é mais utilizada no tratamento de resíduos ou efluentes e não para remediação, pois não se conhece muito bem a especificidade dos agentes químicos, que podem reagir com outros metais, podendo torná-los mais tóxicos ou móveis, ou mesmo aumentar o tamanho da área contaminada (Pedroso, 2003). O uso destes agentes pode desestabilizar todo o ecossistema aquático, uma vez que alterando o Eh, o pH, etc., a permanência ou desenvolvimento adequado da vida aquática pode ser comprometido.

### Remediação física

Quando a concentração de metais pesados em determinado ambiente aquático supera a capacidade de adsorção pelos sedimentos e materiais particulados, bem como a capacidade dos microorganismos e plantas aquáticas acumular esses metais, a remediação física vem a ser uma alternativa importante. Quando isso acontece, a concentração de metais na coluna de água aumenta consideravelmente, pois os drenos estão saturados. Neste caso a retirada de sedimentos ou das plantas aquáticas com altas concentrações de metais pesados torna-se vital para o sucesso da remediação (Mulligan et al., 2001). Quando se trabalha com Wetlands na descontaminação de efluentes de indústrias ou esgotos (ver item 4,1), a retirada dos sedimentos e das plantas torna-se necessária (Pedroso, 2003), uma vez que a saturação é inevitável. O mesmo acontece com os materiais adsorptivos usados no tratamento de efluentes (Pedroso, 2003).

Atualmente, a lavagem e limpeza do solo são as tecnologias inovadoras mais comuns usadas para remover metais em locais como SUPERFUND nos Estados Unidos (Baird, 2007).

### Destino do material a ser removido

O destino dos materiais adsorptivos, plantas e dos sedimentos que acumularam metais pesados, ao serem removidos dos reatores, wetlands ou ambientes aquá-



ticos, deve também ser considerado, pois se trata de um material de alto risco ambiental, e seu destino deve ser planejado conforme o potencial poluidor (Mulligam et al., 2001).

O material vegetal, plantas inteiras ou parte aérea quando retirados do ambiente aquático podem receber vários destinos. Tem sido sugerido a compostagem e posterior distribuição em áreas maiores, proporcionando assim a diluição do contaminante numa área maior. Quando esse material apresentar altas concentrações de Zn ou Cu e isento de elementos que em pequenas concentrações causam sérios problemas ambientais, como é o caso do Cd, Pb ou Hg, tal material pode servir como fonte de adubo para produção de culturas comerciais.

A incineração do material vegetal depois de seco também pode ser utilizada, nesse caso, parte do contaminante volatiliza e o que resta é concentrado num volume muito pequeno, devendo receber destino apropriado. O material vegetal contaminado também pode ser utilizado como substrato para floricultura.

Já para sedimentos contaminados e retirados dos ambientes aquáticos, Mulligam et al. (2001) sugere várias tecnologias para retirada de metais pesados de sedimentos, sendo os principais; **1 – Separação física**, incluindo centrifugação, floculação e sedimentação; **2 – Lavagem**, com a adição de soluções que permitem transferir o contaminante do sedimento para a água de lavagem. Esta técnica pode ser usada para separar Hg, Pb, Cd, Cu, Ni e Cr, quando compostos orgânicos não estão presentes em grandes quantidades; **3 – Extração térmica**, permitindo que com altas temperaturas (geralmente acima de 800°C) elementos como Hg, As e Cd sejam volatilizados. Esta técnica tem sido mais usada para Hg, por ser altamente volátil. No entanto, se os gases produzidos não forem retidos, a atmosfera será afetada; **4 – Bioremediação**, usando microorganismos ou plantas para remover os metais dos sedimentos. Estas técnicas são descritas acima. **5 – Uso de eletrodos de cargas contrárias**, ou seja, um anodo e um catodo são inseridos no sedimento contaminado, fazendo com que o lado positivo expulse os cátions que são retidos no lado negativo. Esse processo permite retirar íons solúveis ou ligados a óxidos e carbonatos, como Cu, Zn, Pb, As, Cd Cr e Ni; **6 – Imobilização**, pela adição de agentes solidificantes ou estabilizantes para reduzir ou imobilizar metais. Esses agentes podem ser argilas, cinzas, cimento, etc.; **7**

– **Oxidação química**, pela percolação de agentes orgânicos ou inorgânicos para reduzir metais para seu menor estado de valência e formando complexos organometálicos estáveis **8 – Isolamento**, pelo capeamento do depósito de sedimentos contaminados com uma cobertura, que pode ser de silte, argila, areia, cascalho, geossintéticos ou multicamadas dos materiais citados (Pedroso, 2003). Essa cobertura permite o isolamento físico, evita que sejam carreados para outros sítios e diminui o fluxo de água no perfil.

A maioria dessas técnicas apresenta custos muito elevados, sendo por isso, pouco usadas (Mulligam et al., 2001). Quando não é possível a realização de qualquer um desses processos, alternativas como depósito em aterros, construção de terraplanagens e estradas podem ser utilizadas, desde que locais que apresentem risco potencial sejam preservados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento industrial e extração indiscriminada de minérios, assim como um manejo inadequado do solo, tem sido os responsáveis pela grande maioria dos problemas relacionados à metais pesados em ambientes aquáticos até hoje. Isso tem levado ao aparecimento de doenças, muitas vezes sem cura, na população humana. Diante disso, as autoridades, no mundo inteiro, estão cada vez mais preocupadas, levando a homologação de leis de proteção ambiental.

A necessidade de cumprir a legislação tem levado a criação de inúmeras tecnologias de limpeza ambiental, desde preventivas quanto remediativas. Os setores industrial e agrícola, são obrigado a obedecer aos limites estabelecidos pela legislação de metais pesados em seus insumos, efluentes ou rejeitos.

Entre as tecnologias de remediação de ecossistemas aquáticos mais utilizadas e estudadas na atualidade, está a bioremediação, que tanto pode ser via microorganismos ou vegetação. Esta tecnologia tem apresentado bons resultados, porém, são adotadas somente quando o problema ambiental já está instalado e causando problemas.

A bioremediação tem sido muito estudada, embora a maioria tenha sido realizada em laboratório, não tendo sua eficiência testada *in situ*. E os estudos de campo se referem à capacidade de microorganismos ou espécies vegetais de remover metais do ambiente,

no entanto, poucos deles têm mostrado se o ambiente foi realmente limpo em relação à presença de metais pesados, talvez porque grande parte dos estudos são de curta duração e os resultados da bioremediação são futuros. A bioremediação é uma tecnologia que esta em crescimento rápido, sobretudo em colaboração com a engenharia genética, utilizada para desenvolver linhagens de microorganismos que tenham a capacidade de lidar com poluentes específicos. A biorremediação é particularmente usada para a remediação de depósitos de lixo e solos contaminados com metais pesados como cádmio.

Mais estudos deverão ser realizados no sentido de viabilizar comercialmente a reprodução de microorganismo e espécies vegetais, que se adaptem aos locais contaminados, e não somente em condições de laboratório.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. **Contaminação química e biorremediação do solo**. P. 299 – 352. IN: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R. (Editores), *Tópicos em Ciência do solo*, Vol 1, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2000.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. 2ª ed. London: Blackie Academic e Professional (1995), Chapman e Hall, 1997. 368p.
- BAIRD, C. *Química ambiental*. Editora Bookman, 2 ed. 622p. 2007.
- BAUDO, R.; BELTRAMI, M.; ROSSI, D. **In situ tests to assess the potencial of aquatic sediments**. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2:361-365, 1999.
- BRIERLEY C. L. **Bioremediation of metal-contaminated surface and ground-water**. *Geomicrobial J.*, 8:499-503, 1990.
- BRIGDEN, K., STRINGER, R.; LABUNSKA, I **Poluição por organoclorados e metais pesados associada ao fundidor de ferro da Gerdau em Sapucaia do Sul**, Brasil, 2000. Laboratórios de Pesquisa do Greenpeace, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade de Exeter, Exeter, Reino Unido. Tradução: Michael Duncan, Cristina Bonfiglioli. 2000. (Nota Técnica: 21/00).
- CAMPANILI, M. **Apenas 22% dos resíduos industriais têm tratamento adequado**. O ESTADO DE SÃO PAULO. 02-05-2002, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA, Disponível em < http://www.cprh.pe.gov.br/sec-legisl/download/resolucoes/20de18dejunhode1986.doc> Acesso em 12/04/2003.
- CARDWELL, A. J.; HAWKER, D. W.; GREENWAU, M. **Metal accumulation in aquatic macrophytes from southeast Queensland, Australia**. *Chemosphere*, 48: 653-663, 2002.
- CASARINI, D. C. P.; DIAS, C. L.; LEMOS, M. M. G. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2001. 730p.ii.
- CERVANTES, C.; CAMPOS-GARCIA, J.; DEVARS, S.; GUITIÉRREZ-CORONA, F.; LOSA-TAVERA, H.; TORRES-GUZMÁN, J. C. & MORENO-SÁNCHEZ, R. **Interactions of chromium with microorganisms and plants**. *FEMS Microbiology Reviews*, 25:335-347, 2001.
- DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. **Adsorção de cádmio em dois latossolos ácidos e um nitossolo**. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:297-304, 2001.
- DORES, E. F. G. C. & De-Lamonica-Freire, E. M. **Contaminação do ambiente aquático por pesticidas. Estudo de caso: águas usadas para consumo humano em primavera do leste, mato grosso – análise preliminar**. *Química Nova*, 24:27-36, 2001.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência/FINEP, 602p. 1998.
- GATLIF, E. G. **Vegetative remediation process offers advantages over traditional pump-and-treat technologies**. *Remed. Summer*, 4:343-352, 1994.
- GLICK, B. R. **Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment**. *Biotechnology Advances*, ARTICLE IN PRESS, 2003.
- GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; SILVA, A. G.; MENDONÇA, E. S.; NETTO, A. R. **Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils**. *Soil Science Society American Journal*, 65:1115-1121, 2001.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELE, M. A. P.; ZULIANI, D. Q. & CAMPOS, M. L. **Elementos-traço em solos, sedimentos e água**. In: V Simpósio Nacional sobre Recuperação de áreas degradadas. Ouro Preto, 2002.
- GUPTA, G.; KARUPPIAH, M. **Heavy metals in sediments of two Chesapeake Bay tributaries – Wicomico and Pocomoke Rivers**. *Journal of Hazardous Materials*. 50: 15-29. 1996.
- GYLIEN, O.; REKERTAS, R. & SALKAUSKAS, M. **removal of free and complexed heavy-metal ions by sorbents produced from fly (*Musca domestica*) larva shells**. *Water Research*, 2002.

- HOLT, M. S. Sources of chemical contaminants and routes into the freshwater environment. *Food Chem. Toxicol.*, V.38, P221-227, 2000.
- JACKSON, J. Metais pesados e outras substâncias tóxicas inorgânicas. In: MATSUI, S. Diretrizes para o gerenciamento de Lagos – Gerenciamento de substâncias tóxicas em lagos e reservatórios. Vol. 4, ILEC, IIE. São Carlos, 2002. p. 71-88.
- JORGENSEN, S. E. *Lake management*. Oxford, Pergamon. (Water Development, supply and management, v. 14), 1980.
- JUCÁ, T. F. J. *Curso de gestão integrada das águas e dos resíduos na cidade*, Ministério da Cidade, Apostila Disposição final de resíduos e recuperação ambiental de áreas degradadas, Brasília, P 40, 2006
- LEDIN, M. Accumulation of metals by microorganisms – processes and importance for soil systems. *Earth-Science Reviews*, 51:1-31, 2000.
- LEWANDER, M.; GREGER, M.; KAUTSKY, L.; SZAREK, E. Macrophytes as indicators of bioavailable Cu, Pb and Zn flow in the river Przemsza, Katowice Region. *Applied Geochemistry*, 11:169-173. 1996.
- KANKONEM, M. A.; PANTSAR-KALLIO, M; MANNINEN, P.K.G. Analysing heavy metal concentrations in the different parts of *Elodea canadensis* and surface sediment with PCA in two Boreal Lakes in Southern Finland. *Chemosphere*, 35(11):2645-2656. 1997.
- MAL, T. K.; ADORJAN, P.; CORBETT, A. L. Effect of copper on growth of an aquatic macrophyte, *Elodea canadensis*. *Environmental Pollution*, (?):1- 5. 2002.
- MALIK, A. Metal bioremediation through growing cells. *Environmental International*, ARTICLE IN PRESS, 2003.
- MARQUES, M.O.; MELO, W.J.; WANDERLEY, J.M. de; MARQUES, T.A. Metais pesados e o uso de biossólidos na agricultura. In: TSUTUYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C. T. de; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p. 365-403.
- MEAGHER, R. B. Phytoremediation of toxic element and organic pollutants. *Plant Biotechnology*, 3:153-162, 2000.
- MELLO, J.W.V. & ABRAHÃO, W.A.P. Geoquímica da drenagem ácida. In: DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V., eds. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. p.45-57.
- MEURER, E. J. *Fundamentos de química do solo*. 3 ed. Porto Alegre: Evangraf, 285 p.2006.
- MULLIGAM, C. N.; YONG, R. N. & GIBBS, B. F. Na evaluation of Technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 85:145-163, 2001.
- PAWLIK-SKOWRONSKA, B. Resistance, accumulation and allocation of zinc in two ecotypes of the green alga *Stigeoclonium tenuis* Kütz. Coming from habitats of different heavy metal concentrations. *Aquatic Botany*, 75:189-198, 2003.
- PEDROSO, M. F. M. Gerenciamento dos resíduos. In: AZEVEDO, F. A. & CHASIN, A. A. M. Metais – Gerenciamento da toxicidade. Editora Atheneu. São Paulo, 2003. p. 493-511.
- PIRES, A. M. M, ANDRADE, C. Metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. In: SPADOTTO, C., RIBEIRO, W. (Ed). Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria. Botucatu: FEPAF, 2006. p.205-232.
- RAI, U. N.; SARITA – SINHA, R. D.; TRIPATHI, P.C. Waste treatability potencial of some aquatic macrophytes: removal of heavy metals. *Ecological Engineering*, 5: 5-12. 1995.
- RASKIN, I.; SMITH, R.D. & SALT, D. S. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 8:221-226, 1997.
- ROCHA, J.C ; ROSA, A.H;CARDOSO, A.A. *Introdução a química ambiental*. 1 ed. Porto Alegre : Bookman, 154 p. 2004.
- RODELLA, A. A. Introdução à especiação iônica em solução aquosa. Piracicaba: FEALQ – Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 141p. 2006.
- SALT, D. E.; SMITH, R. D. & RASKIN, I. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49:643-668, 1998.
- SANTOS, G.C. *Sorção e labilidade de metais pesados em Latossolos de Minas Gerais*. Viçosa, MG: UFV, 2001. 75p. (Tese de Mestrado) –Universidade Federal de Viçosa, MG. 2001.
- SCHNEIDER, I. A. H. *Biosorção de metais pesados com biomassa de macrófitos aquáticos*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1995. 141p. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS).
- SCHNEIDER, I. A. H.; RUBIO, J. Sorption of heavy metal ions by the non living biomass of freshwater macrophytes. *Environmental Science & Technology*, 33: 2213-2217, 1999.

- SINGH, B.R. & STEINNES, E. **Soil and water contamination by heavy metals** In: LAL, R. & STEWART, B.A. Soil Processes and water quality. Ed Lewis Publishers, Florida, 1994. 398p.
- STUMM, W.; MORGAN, J. J. Aquatic chemistry – an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. 2 ed. New York, John Wiley, 1981. 780p.
- SOUZA, S.L. 1999. **Revegetação de área de biorremediação contaminada por resíduos oleosos de petróleo**. Curitiba, 1999. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- USPHS, **8 th Report on Carcinogens 1998**, Summary, 1998.
- WARREN, L. A. & HAACK, E. A. **Biogeochemical controls on metal behaviour in freshwater environments**. Earth-Science reviews, 54:261-320, 2001.
- WOOD, B. & McATAMNEY, C. **The use of macrophytes in bioremediation**. Biotech. Adv., 12:653-662, 1994.