

# Eco-gold: gerando retorno econômico na remediação de passivos ambientais por meio da fitoextração

Fábio N. Moreno<sup>1</sup>, Chris W. N. Anderson<sup>2</sup>, Brett H. Robinson<sup>3</sup>, Meech, J.A.<sup>4</sup> & Joel B. Sígolo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Biólogo, PhD., Instituto de Geociências, USP, São São Paulo, Brasil*

<sup>2</sup>*Geoquímico, PhD., Departamento de Solos, Universidade Massey, P. North, Nova Zelândia*

<sup>3</sup>*Químico, PhD., Instituto Federal de Tecnologia, Zurique, Suíça*

<sup>4</sup>*Professor, PhD., CERMS, Universidade da Colúmbia Britânica, Vancouver, Canadá*

<sup>5</sup>*Professor Titular, Livre-Docente, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, Brasil*

## Abstract

Pesquisa conduzida nos últimos 10 anos pela Universidade Massey (Nova Zelândia), tem focalizado a fitoextração do ouro (Au) e do mercúrio (Hg) como estratégia de remediação e revegetação de solos contaminados. No caso do Au, o alvo da fitoextração é a colheita de 10 toneladas de biomassa por hectare contendo uma concentração média de 100g de Au /tonelada de peso seco. Esta colheita renderia 1 kg do Au na planta. O “eco-gold”, obtido após a extração e processamento da biomassa, valeria US\$ 24,700 ao preço de US\$ 700 a onça (valor de mercado para Novembro de 2007). Este artigo demonstra a viabilidade da fitoextração induzida do ouro (Au) e do mercúrio (Hg) a partir de estudos de caso da aplicação desta tecnologia em experimento de campo. O experimento piloto com a fitoextração do Au foi realizado na Mina Fazenda Brasileiro, Teofilândia, Estado da Bahia. O experimento piloto com a fitoextração do Hg foi realizado na bacia de rejeitos da Mina Tui, Te Aroha, Nova Zelândia. Os resultados obtidos para estes estudos foram promissores e viabilizaram investimentos em experimentos com a fitoextração do Au em escala comercial nos EUA. Uma vez que ambos Au e Hg podem ser acumulados na biomassa vegetal, o próximo passo seria investigar a viabilidade da fitoextração induzida na remediação e revitalização de áreas impactadas pelos garimpos das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil.

*Research carried out by Massey University in the last 10 years has focused on gold (Au) and mercury (Hg) phytoextraction as a remediation and revegetation strategy for contaminated soils. In the case of Au, the phytoextraction target is the harvest of 10 tons of biomass per hectare with an average content of 100 g of Au per ton of dry weight. This harvest would yield 1 kg of Au in the plant. The “eco-gold” obtained after processing the biomass would have a value of US\$ 24,700 at an ounce price of US\$ 700 (market value for November, 2007). This article demonstrates the feasibility of Au and Hg-induced phytoextraction from field-scale case studies. The Au phytoextraction experiment was carried out at Fazenda Brasileiro Mine, Teofilândia, Bahia State. The Hg phytoextraction experiment was carried out in the mining tailings area of the abandoned Tui Mine, Te Aroha, New Zealand. The results achieved for these studies were promising and prompted investments for a commercial scale Au phytoextraction operation in the USA. As both Au and Hg can be induced to accumulate in the plant biomass, the next step is to investigate the feasibility of phytoextraction for remediating and revitalizing artisanal mining areas of Northern and Central-Western regions of Brazil.*

## 1 Introdução

A remediação de ambientes contaminados por meio de sistemas e processos vegetais (fitorremediação) movimentam um mercado de 100 a 150 milhões de dólares nos EUA, o que corresponde a 0.5 % do mercado total de remediação naquele país (Pilon-Smiths, 2005). No Brasil, a comercialização desta tecnologia é ainda incipiente, apesar da demanda por soluções mais econômicas e menos invasivas ao meio ambiente. A possibilidade de retorno econômico pela fitorremediação pode gerar investimentos do setor privado e proporcionar uma demanda para a comercialização desta tecnologia. Este retorno poderia cobrir ou subsidiar parte dos custos totais envolvidos na implantação e operação do processo de fitorremediação.

A fitorremediação quando consorciada com estratégias que promovam a reutilização sustentável de áreas contaminadas pode gerar um retorno econômico ao investidor da seguinte maneira: 1) pela comercialização da madeira de árvores com potencial fitorremediador (e.g. Eucalipto, Cedro,

etc); 2) pela produção de energia a partir da combustão da biomassa vegetal; 3) pelo reflorestamento visando a geração de créditos de carbono e/ou; 4) pela fitoextração visando a recuperação e venda do metal nobre extraído da biomassa sob a forma de “commodity”. Este artigo busca demonstrar a viabilidade da fitoextração a partir de estudos de caso da aplicação desta tecnologia em experimento piloto de campo.

## 2 Fitoextração

A fitoextração é o processo pelo qual metais pesados e metalóides são acumulados em tecidos aéreos de plantas com uma redução gradual da sua concentração no solo a partir de ciclos sucessivos de plantio e colheita. A colheita da biomassa remove o contaminante da área contaminada ao passo que a sua incineração reduz em até 95 % o volume do material a ser descartado, diminuindo o seu custo final de disposição (Moreno, 2005). Para que a remoção de metais seja efetiva, o processo de fitoextração vai depender de dois parâmetros-chave: A) fator de concentração (concentração de metal na planta / concentração de metal no solo) superior a 1 e; B) elevada produção de biomassa vegetal (Moreno et al., 2004).

Uma vez que os mecanismos fisiológicos responsáveis pela acumulação de íons nas plantas dependem de serviços gratuitos da natureza (energia solar e CO<sub>2</sub> atmosférico), o custo total de remediação por meio da fitoextração pode ser vantajoso. De fato, técnicas de fitorremediação para solos contaminados nos EUA têm sido fomentadas por um décimo do custo das tecnologias comercialmente disponíveis para este fim, tais como lavagem de solos, escavação e transporte ou *pump & treat* (Pilon-Smiths, 2005). Dentre as limitações da fitoextração citam-se o nível de fitotoxicidade do solo, que pode inibir o crescimento e desenvolvimento das plantas, a profundidade de penetração das raízes e o tempo total para remoção dos contaminantes do solo.

A fitoextração induzida utiliza espécies vegetais com elevada produção de biomassa associado à aplicação de ligantes químicos no substrato contaminado. Esta técnica envolve as seguintes etapas: 1) plantio e crescimento de espécies em substratos contaminados, 2) aplicação de ligantes químicos específicos ao substrato após desenvolvimento da biomassa, e 3) colheita da biomassa e remoção do contaminante da área afetada. O tratamento dos substratos por ligantes químicos específicos promove a transferência do metal para a fase aquosa do solo, disponibilizando-o às plantas sob a forma de complexos solúveis. Uma vez solubilizado, o metal é absorvido pelas raízes e transportado para os tecidos aéreos. A fitoextração induzida já foi demonstrada em campo para o Pb (Blaylock, 2000). Nas seções abaixo, descrevemos dois estudos de caso para o ouro e o mercúrio.

### 2.1 Estudo de caso 1: fitoextração do ouro

Este estudo foi conduzido em 2003, a partir de uma parceria estabelecida entre o Departamento de Solos da Universidade Massey (Nova Zelândia) e o Centro de Pesquisa em Minerais, Metais e Materiais (CERM3) da Universidade da Colúmbia Britânica (Canadá). A fitoextração foi utilizada com o propósito de se recuperar o ouro (Au) de pilhas de minério aurífero exauridas pelo processo de lixiviação. Estudos anteriores conduzidos pela Universidade Massey demonstraram a acumulação induzida do Au em *B.juncea* desenvolvida em substrato aurífero artificial após tratamento com tiocianatos (Anderson et al., 1998).

O objetivo deste experimento foi demonstrar a viabilidade comercial da tecnologia da fitoextração induzida a partir da colheita de 10 toneladas por hectare com um teor médio de 100g de Au /tonelada de biomassa seca. Esta colheita renderia 1 kg de Au na planta, o qual, após extraído e processado originaria o “eco-gold”, valendo US\$24,700 ao preço de US\$700 a onça (valor de mercado para novembro de 2007). Este experimento de campo foi realizado com a colaboração da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A metodologia e resultados deste experimento serão descritos a seguir.

#### 2.1.1 Material e métodos

O experimento de campo foi realizado na mina de Au Fazenda Brasileiro, localizada no município de Teofilândia, Estado da Bahia. A mina está localizada no semi-árido nordestino, região que apresentou precipitação anual média de 600 mm entre os anos de 1985 a 2002. A mina iniciou suas atividades em 1988 com uma produção anual estimada em 280-420 kg de Au e encerrou em 2003, quando a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) transferiu os direitos de exploração da mina para Yamana Gold Inc.

Um bloco com dimensões de 15m x 15m x 0.5m foi demarcado dentro de uma das áreas de rejeito da mina Fazenda Brasileiro. A base do bloco foi isolada com plástico impermeável e preenchida

com cerca de 150 t de minério oxidado com baixo teor de Au. A estrutura do bloco foi dividida em duas metades iguais (Figura 1 a). A concentração média de Au no minério a partir da coleta de seis amostras foi de 0.66 g/t com pH médio de 8.6.

O bloco foi fertilizado com uréia e fertilizante NPK (5 kg cada). As duas metades do bloco foram divididas em 5 leiras, cada uma com de 5m de largura. Sementes de *Brassica juncea* (mostarda indiana) e *Zea mays* (milho) foram plantadas alternadamente em cada uma das leiras (Figura 1 b). O bloco foi irrigado duas vezes por dia usando um sistema de irrigação por dispersão. O tratamento químico do bloco objetivou induzir a acumulação do Au pelas plantas e ocorreu seis semanas após o plantio das espécies. Este consistiu na aplicação de cianeto de sódio (NaCN) e cianeto de potássio (KCN) a 0.15g/kg de minério (Figura 1 c). Os ligantes químicos foram aplicados sob a forma solúvel (400L por tratamento) com o auxílio de uma bomba elétrica com vazão aproximada de 0.55 L/s. As soluções foram irrigadas a partir de dois tanques, cada um com capacidade para 1000L. A biomassa aérea foi coletada uma semana após o tratamento químico (Figura 1 d). O material foi seco em estufa a 70 °C, pesado em balança analítica e empacotado. Amostras de minério foram coletadas de seis locações distintas no bloco (0-10 cm de profundidade) antes e depois do tratamento químico. Todas as amostras foram analisadas para o teor de Au no Departamento de Solos da Universidade Massey por um espectrofotômetro de absorção atômica.

### 2.1.2 Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a fitoextração induzida do Au na Mina Fazenda Brasileiro. Os valores médios para a concentração de Au foram significativamente mais elevados em *B. juncea* do que em *Z. Mays*. A aplicação de NaCN promoveu uma concentração de Au nos tecidos aéreos quase 60 vezes superior aos valor médio deste metal encontrado no minério. Este ligante foi mais eficaz que o KCN para ambas as espécies testadas.

O período de seis semanas não foi suficiente para que as plantas atingissem máxima produção de biomassa. Sob condições ideais, *B. juncea* pode produzir de 10 a 15 t/ha, ao passo que *Z. mays* pode produzir até 30 t/ha. Portanto, períodos maiores para o desenvolvimento das plantas, variando de 10 a 24 semanas, seriam necessários para que *B. juncea* e *Z. mays* pudessem atingir máxima produção de biomassa.

O percentual de recuperação do Au por leira plantada foi calculado como um produto da concentração média de Au na biomassa e do seu peso seco. Já a massa total de Au no perfil do minério foi calculada assumindo-se uma profundidade de 15 cm (estabelecido de acordo com o comprimento médio das raízes na sexta semana do ciclo de cultivo), uma densidade média de 1.3 g/cm<sup>3</sup> e uma concentração média de Au de 0.6 g/t. O maior percentual de recuperação de Au pela técnica da fitominação foi ao redor de 18% (Tabela 1). Este valor encontra-se dentro da faixa de 10% a 20% para a recuperação do Au a partir de plantas crescidas em substrato aurífero sob condições de casa de vegetação (Anderson et al., 2005). Dentro deste cenário, seriam necessários de 3 a 4 ciclos de cultivo para que a fitoextração atingisse eficiência similar à técnica da lixiviação em pilhas.

Embora as metas de fitoextração do Au não tenham sido atingidas na Mina Fazenda Brasileiro, os resultados obtidos com este estudo foram promissores e viabilizaram investimentos no planejamento e operação de experimentos em escala comercial nos EUA (Figura 2).





Figura 1. Experimento de campo de fitoextração do Au, Mina Fazenda Brasileiro, Teofilândia, BA. Preparo do bloco experimental (a); desenvolvimento da biomassa no minério (b); tratamento com tioligantes (c) e colheita da biomassa (d).

Tabela 1. Resultados da fitoextração induzida do Au após a aplicação de ligantes químicos em minério oxidado da Mina Fazenda Brasileiro.

| Tratamento       | [Au] na planta mg/kg | Biomassa produzida Kg | Biomassa equivalente T/ha | Massa Au na planta Mg | Massa Au no bloco mg | Au recuperado % |
|------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| <i>B. juncea</i> |                      |                       |                           |                       |                      |                 |
| NaCN             | 39±1.1               | 0.83                  | 5.55                      | 32.4                  | 176                  | 18.4            |
| KCN              | 30±3.4               | 0.97                  | 3.24                      | 29.1                  | 354                  | 8.2             |
| <i>Z. mays</i>   |                      |                       |                           |                       |                      |                 |
| NaCN             | 20±1.5               | 1.12                  | 3.75                      | 22.4                  | 354                  | 6.4             |
| KCN              | 10±2.9               | 0.74                  | 4.95                      | 7.4                   | 176                  | 4.2             |



Figura 2. Operação comercial de fitoextração do Au, Estado de Washington, EUA, 2007. Colheita da biomassa de *B. juncea* após tratamento do substrato com tioligantes.

## 2.2 Estudo de caso 2: fitoextração do mercúrio

Esse estudo foi conduzido em 2004, nos rejeitos da Mina Tui, localizado na face noroeste do Monte Te Aroha, cidade de Te Aroha, Ilha Norte da Nova Zelândia. Experimentos anteriores conduzidos em casa de vegetação na Universidade Massey demonstraram a acumulação induzida do Hg em *B. juncea* a partir do tratamento de rejeitos desta mina com o ligante tiosulfato de amônio

(Moreno et al., 2004). A sequência deste estudo buscou testar a viabilidade da fitoextração induzida em nível de campo visando à aplicação futura desta tecnologia em escala comercial.

### 2.2.1 Material e métodos

A Mina Tui esteve ativa entre os anos de 1967 a 1974, com capacidade de extrair e processar até 100 toneladas por dia de minério. O rendimento médio da mina era de até 10 toneladas de concentrado contendo principalmente Pb (7%), Cu (0.6%) e Zn (17%) além de quantidades inferiores de Hg, Cd, Au e Ag. Os principais minérios presentes no subsolo de Tui são a esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) e pirita (FeS<sub>2</sub>). Os rejeitos da Mina Tui foram depositados a céu aberto cobrindo uma área equivalente a 100.000 m<sup>3</sup> (Figura 3 a). O pH ácido dos rejeitos da mina Tui (na faixa de 3 a 4) deve-se à produção *in situ* da drenagem ácida. O teor de Hg varia de 0.3 a 3.95 mg de Hg por kg de rejeito.

Foram demarcados 3 blocos dentro da bacia de rejeitos, cada um desses com dimensões de 5m x 5m (Figura 3 b). Os blocos foram fertilizados com NPK a uma taxa de 75g/m<sup>2</sup> e tiveram o pH corrigido para 5-6 por meio da adição de carbonato de cálcio. Composto orgânico foi adicionado a uma taxa de 3.2 L/m<sup>2</sup>. Cerca de 75g de sementes de *B. juncea* foram plantadas em duas leiras de 5m de comprimento x 0.5 m de largura x 0.15 m de profundidade. Após a semeadura, amostras de rejeito (n = 4) foram coletadas de cada bloco (0-15 cm de profundidade). O tratamento químico dos blocos, realizado após o crescimento da biomassa, consistiu na adição de solução de tiosulfato de sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a uma concentração de 5g/kg de rejeito. O tiosulfato de sódio foi escolhido para o estudo de campo por que o tiosulfato de amônio não é comercializado no atacado. Relativo à capacidade de solubilização do Hg, contudo, experimentos de laboratório mostraram que o sal de sódio não é significativamente diferente do sal de amônio ( $P > 0.05$ ). O tratamento controle consistiu de amostras de plantas que foram coletadas de cada uma das leiras previamente à aplicação do ligante químico. A biomassa de cada bloco foi coletada duas semanas após o tratamento químico. A solubilidade do Hg na fração líquida das amostras coletadas foi determinada através de testes laboratoriais na presença do tiosulfato de sódio. Todas as amostras foram analisadas para o teor de Hg no Departamento de Solos da Universidade Massey por um gerador de hidretos acoplado a um espectrofotômetro de absorção atômica.



Figura 3. Visão geral da bacia de rejeitos (a) e bloco experimental antes da aplicação do Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ao substrato (b), Mina Tui, Te Aroha, Nova Zelândia.

### 2.2.2 Resultados

Os resultados obtidos para a fitoextração induzida do Hg estão mostrados na Figura 4 e na Tabela 2. A adição de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aos rejeitos aumentou a solubilidade do Hg, levando a um incremento na acumulação do Hg nos tecidos aéreos de *B. juncea*. A concentração de Hg solúvel na fração líquida aumentou proporcionalmente à concentração de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adicionado aos rejeitos (Figura 4). O tratamento com o tiosulfato induziu um aumento significativo na concentração de Hg na porção aérea das plantas relativo ao tratamento controle, o qual teve valores de Hg inferiores ao nível de detecção. A concentração de Hg nos ramos de *B. juncea* foi mais elevada no bloco número dois, com média obtida de 9.77 mg/kg (Tabela 2).

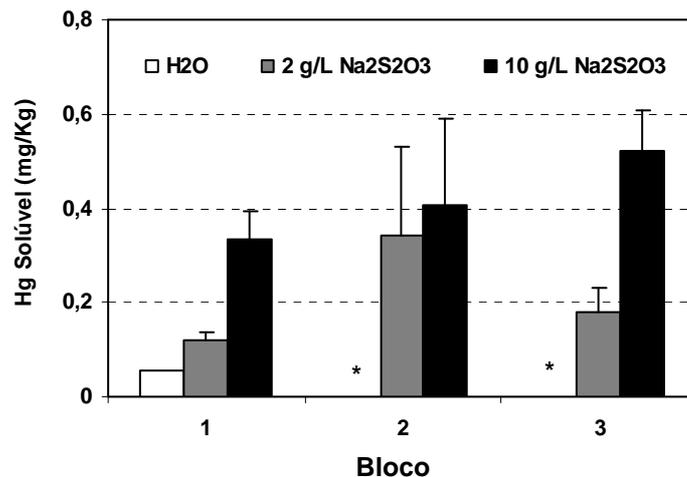


Figura 4. Mercúrio solúvel na fração líquida dos rejeitos da Mina Tui como resultado da aplicação de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas concentrações de 2 e 10 g/l. Barras de erro se referem ao desvio padrão ( $\pm 1$ ) da média de três repetições. O símbolo (\*) indica Hg abaixo dos níveis de detecção.

Tabela 2. Resultados da fitoextração induzida do Hg após a aplicação do Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a 5 g/kg) em blocos delimitados dentro da área de rejeitos da Mina Tui\*.

| Bloco | [Hg] na planta (mg/kg) | Biomassa produzida (kg, DW) | Biomassa equivalente (t/ha) | [Hg] Removido (g/ha) |
|-------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1     | 2.99 $\pm$ 0.5         | 0.19                        | 0.38                        | 1.14 $\pm$ 0.2       |
| 2     | 9.77 $\pm$ 1.2         | 1.24                        | 2.49                        | 24.39 $\pm$ 3.1      |
| 3     | 2.93 $\pm$ 0.7         | 1.16                        | 2.33                        | 6.84 $\pm$ 1.7       |

\*Valores são a média  $\pm$  1 desvio padrão de 5 repetições

As estimativas para produção de biomassa nos rejeitos da Mina Tui indicaram um rendimento entre 0.3 e 2.5 toneladas de matéria seca por hectare (Figura 4). A acumulação do Hg nos tecidos aéreos obteve médias que variaram de 2.9 a 9.77 mg/kg (Tabela 2). Os baixos valores para produção de biomassa e para acumulação do Hg (principalmente nos blocos 1 e 3) determinaram uma baixa eficiência de fitoextração. O valor máximo para a remoção do Hg foi obtido no bloco dois, com média de cerca de 25 g por hectare (Tabela 2).

A limitada produção de biomassa pode ser explicada pelas condições extremamente fitotóxicas dos rejeitos da Mina Tui, os quais contêm, além do Hg, concentrações variadas de Zn, Cd, Pb, As e Ag. A baixa acumulação do Hg nos tecidos aéreos, por outro lado, pode ter sido influenciada pelos baixos valores de Hg solúvel encontrado nos blocos amostrados (valor máximo de 0.6 mg/kg) (Figura 4). Uma vez que a acumulação do Hg nos tecidos aéreos é uma função da concentração de Hg solúvel no substrato (Moreno, 2005), baixos valores de Hg solúvel no substrato induzem uma baixa acumulação de Hg na planta. Entretanto, o fator de concentração de Hg (concentração de metal na planta/ concentração de metal no substrato) obtido para o bloco dois foi superior a 3, o que é um resultado promissor para esse estudo.

É importante mencionar o experimento de campo com a fitoextração do Hg conduzido em Almadén, na Espanha, aonde se obteve média máxima de 0.71 g/ha para a remoção do Hg com o plantio de *Hordeum vulgare* (cevada) (Rodríguez, et al., 2003). Este valor representa apenas 3% do valor máximo obtido para a remoção do Hg dos rejeitos da Mina Tui com a utilização da fitoextração induzida. A estratégia utilizada para a remoção do Hg no experimento de Almadén não envolveu a adição de ligantes químicos ao substrato, o que demonstra ser essa tecnologia capaz de aumentar a eficiência de remoção do Hg pelas plantas.

Durante a fitoextração, podem ocorrer perdas do Hg para a atmosfera como resultado da volatilização do vapor Hg (0). Esse processo pode ocorrer a partir da redução do Hg (II) a Hg (0) pela ação de bactérias presentes na rizosfera das plantas, ou pode ser induzido a partir da incidência da luz solar na superfície do solo (redução fotoquímica) (Moreno et al., 2005). Após a aplicação dos

tioligantes, o mercúrio mobilizado pode lixiviar na coluna do solo sob a forma de complexos solúveis. A lixiviação pode contribuir com perdas significativas do Hg no sistema solo-planta e ocasionar um risco de contaminação de águas subterrâneas (Moreno et al., 2004). Ambos os processos de volatilização e lixiviação devem ser investigados com grande profundidade em estudos de campo de forma a se determinar a magnitude e importância dos impactos ambientais advindos da utilização desta tecnologia.

### 3 Remediação e revitalização de áreas impactadas pelo garimpo do ouro

A fitoextração poderia ser aplicada para a remediação de rejeitos contaminados pelo Hg em áreas de mineração artesanal ou garimpos no Brasil e em muitos países da América Latina, Ásia e África. A técnica do amalgamento utilizada pelos garimpeiros para a extração do Au, por exemplo, não é 100% eficiente e, frequentemente gera rejeitos contendo ambos, Hg e Au. O descarte deste rejeito em solos produz áreas contaminadas com elevados níveis de ambos os elementos (Figura 5 a). Por exemplo, estima-se que os rejeitos contaminados pelo Hg do garimpo de Serra Pelada, na região Norte do Brasil, contemham perto de 50 toneladas de Au (Coomigasp, 2007). O Hg apresenta propriedades geoquímicas muito similares ao Au e ambos os metais podem se tornar solúveis na presença de tioligantes (ligantes químicos contendo o enxofre como grupo funcional). A técnica da fitoextração induzida pode ser utilizada para acumular Au e Hg nos tecidos de espécies vegetais desenvolvidas em rejeitos de garimpo que contemham ambos os elementos em concentrações não-fitotóxicas.

A recuperação do Au da planta e venda do “eco-gold” como “commodity” (com a disposição adequada da cinza residual enriquecida com Hg) poderia estimular a remediação dos rejeitos de mina pelos próprios garimpeiros. A tecnologia da fitoextração induzida poderia ser transferida para cooperativas de garimpeiros ou organizações não-governamentais, as quais poderiam gerenciar e investir os ganhos obtidos na reabilitação de áreas contaminadas (remediação, controle da erosão e revegetação) e na revitalização da comunidade de garimpeiros (obras de infra-estrutura, saneamento, postos de saúde e escolas) (Figura 5 b).



Figura 5. Área contaminada pelo mercúrio em zona de garimpo do ouro (a) e aspecto típico de vilarejo desenvolvido em zonas de garimpo (b), Serra Pelada, Teofilândia, Estado do Pará.

### 4 Conclusões

Os estudos de caso descritos nesse artigo indicam ser a fitoextração induzida uma tecnologia viável com potencial de utilização na remediação e revitalização de áreas contaminadas. Além disso, os resultados para a acumulação induzida do Au e do Hg em plantas demonstraram que é possível transpor para a realidade os resultados obtidos em escala de laboratório ou casa de vegetação.

O ineditismo deste trabalho reside na demonstração de uma técnica relativamente simples e barata de descontaminação de solos que permite transferir elementos poluentes e ou metais nobres de uma matriz inorgânica e mineral (solos e substratos) para uma matriz orgânica e autotrófica (plantas). No processo, ocorre a concentração de elementos nos tecidos vegetais, gerando um resíduo de baixo volume de descarte.

A fitoextração induzida pode ser utilizada em conjunto com tecnologias convencionais de remediação para atingir os padrões estabelecidos pelas agências ambientais estaduais de acordo com o

uso pretendido do solo. Uma outra utilização viável seria na revegetação de pilhas exauridas ou de rejeitos de mineração como parte do programa de recuperação de áreas degradadas (PRAD).

Contudo, previamente à implementação desta tecnologia em escala comercial, estudos adicionais com a fitoextração induzida do Hg devem ser realizados com os seguintes objetivos: 1) investigar a estabilidade e mobilidade do complexo Hg-ligante na coluna do solo visando determinar o risco de contaminação de águas subterrâneas e; 2 ) quantificar o processo de volatilização do vapor Hg (0) a partir de ensaios piloto no campo.

## Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa de pós-doutorado (PDJ) concedida ao primeiro autor. Os autores também agradecem o Sr. Alcides Paiva, o Sr. José Cerqueira e o Sr. Bob Toes pelo apoio técnico recebido durante a realização dos experimento na Mina Fazenda Brasileiro e na Mina Tui.

## Referências Bibliográficas

- Anderson, C.W.N., Brooks, R.R., Stewart, R.B. & Simcock,R., Harvesting a crop of gold in plant, *Nature*, **395**, 553-554, 1998.
- Anderson, C., Moreno, F., & Meech, J., A field demonstration of gold phytoextraction technology. *Minerals Engineering*, **18**,385-392,2005.
- Blaylock, M.J., Field demonstrations of phytoremediation of lead-contaminated soils. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*, eds. N. Terry & G. Bañuelos, Lewis Publishers, USA, pp 1-12, 2000.
- COOMIGASP, Cooperativa de Mineração dos Garimpeiros de Serra Pelada, <http://www.coomigasp.com.br>, online website, 2007.
- Moreno, F.N., Anderson, C.W.N., Stewart, R.B. & Robinson, B.H, Phytoremediation of Hg-contaminated mining tailing by plant-Hg induced accumulation, *Environmental Practice*, **6**, pp.165-175, 2004.
- Moreno, F.N., Phytoremediation of Hg-contaminated mine wastes, *PhD. Thesis*, Palmerston North, Nova Zelândia, 196 pp., 2005.
- Moreno, F.N., Anderson, C.W.N., Stewart, R.B. & Robinson, B.H., Mercury volatilisation and phytoextraction from base-metal mine tailings, *Environmental Pollution* **136**, pp. 342-352, 2005.
- Pilon-Smits, E., Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*,**56**, pp.15-39, 2005.
- Rodriguez, L., Lopez-Bellido, F.J., Carnicer, A. & Alcade-Morano, V., Phytoremediation of Hg-polluted soils using crop plants. *Fresenius Environmental Bulletin*, **12(9)**, pp. 967-971, 2003.