



IV-606 - AVALIAÇÃO DE REMOÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS POTENCIALMENTE TÓXICOS PRESENTES EM REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, POR VETIVER APLICADO EM SISTEMA DE ILHA FLUTUANTE

Angelo Tadeu Magno Leão⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pelo Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Pós-graduando em Gestão Estratégica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Valéria Cristina Palmeira Zago⁽²⁾

Engenheira Agrônoma. Docente Titular no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Doutorado em Ciência do solo (UFRRJ) e Pós-doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG)

Endereço⁽¹⁾: Rua Genebra , 650 – Nova Suíça - Belo Horizonte - MG - CEP: 30.421-052- Brasil - Tel: (31) 99821-2635 - e-mail: magno.1995@hotmail.com

RESUMO

Em 2015, no município de Mariana-MG, subdistrito de Bento Rodrigues, ocorreu o maior acidente envolvendo uma barragem de rejeitos de mineração da história brasileira, sem precedentes quanto aos impactos socioambientais ocorridos. Em um curto espaço de tempo, milhões de metros cúbicos de lama foram carregados para a bacia hidrográfica do Rio Doce, trazendo impactos diretos à flora, fauna, aos recursos hídricos e ao solo. A lama, que ficou disposta sobre o solo e no leito dos cursos d'água, apresenta em sua composição, diversos elementos químicos tóxicos. Considerando este contexto, é imprescindível o desenvolvimento de tecnologias, especialmente com baixo custo, que possibilitem a recuperação dessas áreas degradadas. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade da espécie *Chrysopogon zizanioides* (Vetiver), em um sistema de ilhas flutuantes, de remover elementos químicos potencialmente tóxicos em diferentes concentrações de rejeito de minério de ferro, originário da barragem de Fundão, no município de Mariana-MG. O experimento foi realizado com três concentrações de rejeito (0, 150 e 300 g de rejeito/vaso), com volume fixo de água e solução nutritiva, utilizando a técnica de ilha flutuante, construída dentro de recipientes plásticos abertos. Foram monitorados parâmetros físico-químicos de qualidade da água, parâmetros de crescimento vegetativo e de partição dos elementos em raízes e parte aérea. O desenvolvimento vegetativo não foi afetado pelo rejeito nas concentrações utilizadas, quando se comparou ao controle. Porém, recomenda-se em próximos estudos, a utilização de mudas maiores, que apresentem um sistema radicular mais desenvolvido, de modo ter maior contato com os sedimentos; além de aumentar a sua capacidade de absorção dos elementos potencialmente tóxicos.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Químicos Potencialmente Tóxicos; Recuperação de Áreas Degradadas; Rejeito de Mineração; Vetiver; *Wetland*.

INTRODUÇÃO

Em 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana–MG, a qual armazenava um volume de 50 milhões de m³ de rejeitos de mineração. Instantaneamente, 34 milhões de m³ de rejeitos foram lançados no meio ambiente (IBAMA, 2015).

O acidente afetou os rios Santo Antônio, Gualaxo do Norte, do Carmo e Piranga, os quais são afluentes do rio Doce (AZEVEDO, 2015). Os teores de Mn e Fe nas águas dos rios Carmo e Doce, demonstraram-se superiores aos valores máximos permitidos para as águas enquadradas como de classe 2, segundo a Resolução 357 do CONAMA (MILANEZ e LOSEKANN, 2016). Devido à alteração de parâmetros analíticos de avaliação da qualidade da água após o acidente, faz-se necessário um monitoramento contínuo do ambiente afetado, sendo imprescindível a implantação de ações para remediação ou recuperação da área afetada (IBAMA, 2015).

Dentre as tecnologias disponíveis para a remediação de áreas degradadas, a fitorremediação caracteriza-se pelo uso de plantas e associação com microrganismos para limpeza de ambientes contaminados (PILON-SMITS, 2005). Na fitorremediação, a parte da planta onde ocorre a acumulação de elementos ou substâncias potencialmente tóxicas é determinante para o manejo, como, por exemplo, a remoção apenas da parte aérea ou da planta inteira (TAVARES, 2007).

As ilhas flutuantes artificiais são uma tecnologia de baixo custo para tratamento de águas residuais, em ambientes lênticos e lóticos. Essas ilhas são pequenas plataformas artificiais que permitem que suas raízes se espalham em contato com a água, criando colunas densas de raízes com grande área de superfície. Não apenas as plantas absorvem nutrientes e contaminantes, as raízes das plantas e o material da ilha flutuante fornecem uma extensa área de superfície para os micróbios crescerem - formando uma camada viscosa de biofilme. O biofilme é onde a maioria da absorção e degradação de nutrientes ocorre. O abrigo fornecido pelo tapete flutuante também permite que sedimentos e elementos se assentem, reduzindo a turbulência e misturando-se pelo vento e pelas ondas. O ecossistema único que se desenvolve cria o potencial para capturar nutrientes e transformar poluentes em subprodutos inofensivos (IISD, 2021). No entanto, um dos fatores limitantes no seu uso é a escolha de espécies vegetais que possam tolerar e eliminar contaminantes (VÁSQUEZ et al., 2022).

O Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) é uma espécie vegetal que possui grande versatilidade e tolerância a condições ambientais extremas e tem se mostrado capaz de acumular metais em suas raízes e brotos (DANH et al. 2009). A espécie *Chrysopogon zizanioides* não é classificada como macrófita aquática, no entanto, pode ser introduzida nos ambientes aquáticos, desde que plantada em uma estrutura projetada para a mesma flutuar. Alguns estudos utilizando o Vetiver, em um sistema de ilhas flutuantes com remoção de poluentes em águas superficiais, mostraram-se promissores do ponto de vista técnico e econômico (LARGO, 2021).

OBJETIVO

Avaliar o desenvolvimento de mudas de *Chrysopogon zizanioides* e a presença de elementos potencialmente tóxicos em seus tecidos, em diferentes concentrações de rejeitos de mineração de ferro, oriundo do rompimento da barragem do Fundão, no município de Mariana-MG.

MATERIAIS E MÉTODOS

O rejeito foi coletado no subdistrito de Bento Rodrigues, município de Mariana- MG e encaminhado para análises químicas para determinar a composição química do rejeito. O experimento foi conduzido no período de junho a setembro de 2019. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos, com concentrações crescentes de rejeitos (0, 150 e 300 g de rejeito/vaso), com três repetições. Foram utilizadas caixas de polietileno de 30 l, com 35 cm x 25 cm x 35cm (altura x largura x comprimento). Em cada caixa, foi adicionada uma solução com água de torneira e rejeito (considerando as diferentes concentrações). No dia da implantação do experimento, também foi adicionada uma solução nutritiva (25ml/caixa). Na superfície da lâmina d'água foi colocada uma placa de isopor furada, para sustentação das mudas de Vetiver. Para oxigenação da água utilizou-se uma minibomba submersa (Figura 1).

As mudas de Vetiver com três meses de idade foram higienizadas e padronizadas (equalização de altura da parte aérea e comprimento das raízes) (Figura 1). Posteriormente, as mudas foram introduzidas em furos feitos no isopor, de modo que suas raízes ficassem em contato com a água. Quinzenalmente, amostraram-se 60 ml da solução (rejeito:água) de cada tratamento durante um período de três meses e, encaminhadas ao laboratório de química do CEFET-MG campus I, para análises dos parâmetros pH, condutividade elétrica (CE) e turbidez.



Figura 1: Experimento (ilhas flutuantes em escala reduzida), com mudas de Vetiver suspensas em placa de isopor

Monitorou-se o crescimento vegetativo de plantas no primeiro e último dias do experimento, totalizando 90 dias, medindo-se a altura da muda (da raiz até o final da folha maior) e comprimento das raízes (da ponta da raiz mais longa à inserção da raiz ao caule), com uso de uma régua comum e; o diâmetro do caule da parte aérea (3 cm a partir do colo da parte aérea), utilizando-se um paquímetro digital. Ao final do experimento, as plantas foram coletadas e separadas em raízes e parte aérea. As amostras foram pesadas em balança analítica para determinar a matéria fresca e, posteriormente, elas foram dispostas em estufa a 50°C com ventilação forçada até peso constante, para determinação da matéria seca.

Amostras da matéria seca da parte aérea (MFPA) e matéria seca das raízes (MFR) foram encaminhadas para análises laboratoriais, para determinação de elementos químicos presentes nos tecidos vegetais. Foram utilizados os seguintes métodos: Espectrofotometria de Absorção Atômica (Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobre, Cromo, Ferro, Magnésio, Manganês e Zinco); Espectrometria de chama de emissão (Potássio e Sódio); Turbidimetria do sulfato de bário (Enxofre); Colorimetria do metavanadato (Fósforo total) e Semi-micro-Kjeldahl (Nitrogênio). Para todos os parâmetros analisados foi realizada a análise de variância estatística e teste de médias (Tukey, 5%), utilizando o software Sisvar (FERREIRA, 2019).

RESULTADOS OBTIDOS

As análises feitas para caracterizar a de composição química do rejeito estão discriminadas a seguir:

Tabela 1: Resultados das análises físicas e químicas do rejeito do rompimento da barragem do Fundão, Bento Rodrigues, Mariana-MG

TIPO DE ANÁLISE	PARÂMETRO	UNIDADE	REJEITO ¹
Granulometria	Areia total		64,13
	Silte	%	27,7
	Argila		8,17
Matéria Orgânica	Matéria orgânica	dag/kg	1,06
	Carbono Orgânico		0,62
Macronutrientes	P2O5		27,5
	K2O		72,27
	Ca	mg/dm ³	290,56
	Mg		14,58
	N		600
Micronutrientes*	Cobre		1,4
	Manganês	mg/dm ³	116,9
	Ferro		125
	Zinco		2,1
Capacidade de troca catiônica e índices de saturação	Al		0,01
	Sódio		0,19
	Soma de bases trocáveis	cmol.c/dm ³	1,91
	CTC efetiva		1,92
	CTC Total		2,58
	Saturação Al	(%)	0,53
	Saturação Na		7,4
	pH		7

*Elementos disponíveis na solução (extrator Mehlich)

Não foram observadas diferenças significativas para parâmetros (pH, CE e turbidez) entre os tratamentos, durante a condução do experimento (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros físicos e químicos da solução de crescimento, com diferentes concentrações do rejeito, ao final do experimento.

TRATAMENTO	pH	COND ELÉTRICA**	TURBIDEZ***
Controle*	8,39 a	0,23 (0,09) a	5,10 a
150 g de rejeito	8,41 a	0,23 (0,09) a	8,05 a
300 g de rejeito	8,07 a	0,23 (0,09) a	8,49 a
CV%	10,39	11,67	55,4

* Controle = 0g; ** mS/cm (valores entre parênteses representam a salinidade), utilizando-se a fórmula: (CE elevada à potência 1,0878) x 0,4665 em g/l; *** UNT; os dados apresentados na tabela são os originais, porém a análise estatística foi realizada com dados transformados, utilizando log (10)Y

Em relação aos parâmetros do desenvolvimento vegetativo, não se observaram diferenças significativas para a altura da muda, diâmetro do caule, n° de perfilhos, comprimento das raízes, matéria fresca e matéria seca (Tabela 3)

Tabela 3: Parâmetros de desenvolvimento vegetativo de *Chrysopogon zizanioides* em sistema de ilha flutuante

Trat	Alt	Diâm caule	Comp raízes	n° perfilhos				
					MF PA	MF R	MS PA	MS R
		cm			gramas			
Controle*	16,38 a**	6,95 a	37,75 a	0,60 a	5,39 a	7,59 a	2,71 a	3,89 a
150 g	18,33 a	7,17 a	44,00 a	0,73 a	5,82 a	7,87 a	3,04 a	3,63 a
300 g	17,70 a	6,86 a	44,50 a	0,53 a	5,46 a	5,51 a	2,61 a	2,94 a
CV%	32,5	9,49	21,77	40,09	27	40	27	37

Obs: MF – massa fresca; MS-massa seca; R-raízes; PA-parte aérea; *Controle = 0 g de rejeito; 150 e 300 g de rejeito; ** médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste Tukey (P<0,05)

Para os macronutrientes não se observaram diferenças estatísticas entre tratamentos, tanto para as raízes, quanto para a parte aérea, exceção feita ao Mg que apenas no tratamento Controle (0 g de rejeito) nas raízes, o seu teor foi maior, diferindo dos demais. Em termos da concentração de translocação dos elementos analisados, observou-se a seguinte ordem: K>N>Ca>Mg>P>S (Tabela 4).

Tabela 4: Partição dos macronutrientes nas raízes e parte aérea de mudas de Vetiver, crescendo em diferentes concentrações de rejeito de mineração de ferro.

Elementos	Raízes				Parte aérea			
	0	150	300	CV%	0	150	300	CV%
	mg/kg				mg/kg			
N	8600 a	7300 a	7300 a	13	8000 a	8000 a	7300 a	15
P	1200 a	1000 a	800 a	17	1333 a	1133 a	1200 a	12
K	7700 a	7000 a	9200 a	26	19733 a	24933 a	19900 a	40
Ca	3900 a	2600 a	2100 a	30	5533 a	5233 a	6866 a	19
Mg	2800 b	1800 a	1400 a	15	3533 a	3900 a	3600 a	27
S	1200 a	700 a	1400 a	30	2066 a	967 a	1500 a	37

Obs: Médias seguidas de letras iguais nas linhas, não diferem significativamente pelo teste Tukey ($P < 0,05$)

Na partição de elementos químicos potencialmente tóxicos analisados observou-se nas raízes, que o tratamento com maior concentração de rejeito (300 g), apresentou maior teor de Fe foi maior; enquanto para o Mn, os tratamentos com rejeitos (150 e 300 g) foram superiores em relação ao trabalho controle (sem rejeitos). Já para o Zn, a maior concentração de rejeitos foi a que apresentou menor teor deste elemento. Para os demais elementos, não se observou diferenças significativas. Percebe-se que os elementos não foram translocados em grandes quantidades para a parte aérea, apenas o teor de Cd foi maior no tratamento com mais concentração de rejeito (300 g). Já os teores de Pb e Zn foram maiores no controle (Tabela 5).

Tabela 5: Elementos químicos potencialmente tóxicos presentes nos tecidos vegetais do Vetiver, crescendo em concentrações crescentes de rejeito de mineração de ferro

Elementos	Raízes				Parte Aérea			
	0	150	300	CV%	0	150	300	CV%
	mg/kg				mg/kg			
Cu	12 a	14 a	9 a	24	8 a	7 a	8 a	30
Fe	411 b	164 b	21.450 a	13	342 a	366 a	242 a	26
Mn	68 b	173 a	143 ab	24	180 a	201 a	194 a	20
Zn	44 ab	67 a	11 b	53	42 a	4 b	10 b	32
Cd	3 a	2 a	2 a	30	2 b	2 b	6 a	21
Cr	51 a	45 a	33 a	20	54 a	54 a	36 a	31
Pb	12 ab	11 a	25 a	34	25 a	9 b	10 b	30
Na	53 a	47 a	53 a	30	57 a	50 a	60 a	35

Obs: médias seguidas de letras iguais nas linhas, não diferem significativamente pelo teste Tukey ($P < 0,05$)

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em relação aos parâmetros de qualidade da água avaliados, observou-se que tanto o pH, turbidez e condutividade elétrica (convertida para salinidade) coincidiram com a classificação de água doce I (CONAMA 357/ 2005). O Vetiver possui uma grande capacidade de adaptação a uma ampla faixa de pH (DANH et al., 2009). Segundo Troung (1991) apud Grimshaw (1995), quando cultivado em solo, pode se desenvolver em uma faixa de pH de 3 a 11. Porém, para a maioria das espécies, um pH elevado, como observado no experimento, ferro, manganês e zinco podem ficar indisponíveis para as plantas (RENGEL, 2023).

Neste experimento, os vasos receberam uma quantidade mínima de nutrientes na sua implantação, através de solução nutritiva; além disso, o rejeito também se mostrou muito pobre em nutrientes (Tabela 2). Com isso, a CE manteve-se muito baixa durante o experimento (0,23 mS/cm), o que pode ter comprometido o desenvolvimento das plantas. Para a maioria das plantas, uma faixa de CE ideal deve estar entre um e três mS/cm (HIDROPONIA BRASIL, 2021).

Igualmente, para a turbidez, observou-se um decaimento inicial, variando de 5 a 8 UNT no final do experimento. Tal comportamento pode ter se dado, devido à sedimentação das partículas do rejeito. Rocha et al. (2018), estudando ilhas flutuantes em um açude, também observaram os maiores valores de turbidez nos primeiros dias após a instalação do sistema. De acordo com Lopes et al. (2020), por meio de agitação lenta, formam-se flocos das partículas desestabilizadas, que são subsequentemente removidos na sedimentação.

Em relação aos parâmetros de desenvolvimento vegetativos avaliados no experimento, Banerjee et al. (2019) também observaram resultados semelhantes utilizando Vetiver, crescendo sobre rejeitos de mineração de ferro. No entanto, Tambunan et al. (2017), também avaliando o desenvolvimento de Vetiver, encontraram valores para a matéria seca foram superiores ao encontrados neste experimento. Já Vimala et al. (2022) em estudos anteriores indicaram que o vetiver cultivado em rejeitos de minério de ferro, observaram concentrações de 5,31-5,42, 0,45-



0,50 e 1,27-1,46%, respectivamente, para N, P e K na parte aérea. Valores inferiores aos observados no presente estudo.

Segundo Malavolta (1980), concentrações de Fe entre 50 e 100 mg/kg como adequadas para um crescimento normal das plantas. Percebeu-se que o tratamento com maior concentração de rejeito conduziu a teores muito elevados de ferro nos tecidos das raízes do Vetiver. Assim, os teores de Fe, assim como nenhum dos demais elementos foram translocados em grandes quantidades para a parte aérea (Tabela 5). Já as concentrações de Mn nas plantas podem variar muito, entretanto, concentrações entre 20 e 500 mg/kg são consideradas adequadas para um crescimento e desenvolvimento normais das plantas. O Cu, por sua vez, possui baixa concentração nos tecidos da planta, geralmente entre 2 e 20 mg/kg na matéria seca (MALAVOLTA, 1980).

Consideram-se os teores de Zn inferiores a 25 mg/kg de matéria seca da planta, como deficiência deste nutriente nas folhas. Os tratamentos com rejeito apresentaram teores inferiores a este limite na parte aérea (Tabela 05). Porém, os teores de Cd, Pb e Cr entre 5 e 30 mg/kg; 30-300 mg/kg e 1-10 mg/kg são considerados fitotóxicos, respectivamente (KABATA-PENDIAS, 1984). Segundo Korndorfer (2007), em relação ao sódio, a concentração normal na matéria seca das plantas é entre 13 e 35000 mg/kg.

Segundo ROONGTANAKIAT (2009), para espécies não hiperacumuladores, como o vetiver, é necessário melhorar a biomassa e a propagação para obter alta eficiência da fitorremediação. Se forem necessários agentes quelantes para aumentar a biodisponibilidade de metais pesados, é necessário estabelecer o crescimento do vetiver antes da aplicação. Uma vez que o vetiver esteja totalmente crescido, o crescimento aéreo deve ser colhido periodicamente para remover os metais pesados do local contaminado e acelerar novo crescimento para mais captações.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento vegetativo não foi afetado pelo rejeito nas concentrações utilizadas, quando se comparou ao controle. Porém, recomenda-se em próximos estudos, a utilização de mudas maiores, que apresentem um sistema radicular mais desenvolvido, de modo ter maior contato com os sedimentos; além de aumentar a sua capacidade de absorção dos elementos potencialmente tóxicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO, A. L. Os rios que carregam esperança para o Doce. O Globo, São Paulo, 12 dez. 2015b. Disponível em: <<https://goo.gl/dgNANx>>. Acesso em: 15 nov. 2016.
2. BANERJEE, R., et al., 2016. *Vetiver grass: an environment clean-up tool for toxic mineral elements contaminated iron ore mine-soil*. Ecol. Eng. 90, 25-34.
3. DANH, L; TRUONG, P; MAMMUCARI, R. et al. Vetiver grass, *Vetiveria zizanioides* L.: a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes. International journal of phytoremediation, v. 11, n. 8, p. 664-691, 2009.
4. GRIMSHAW, R. G.; FAIZ, A. *Vetiver Grass: Application for Stabilization of Structures*. The World Bank, [s. l.], 1995.
5. IBAMA, DIPRO, CGEMA. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Belo Horizonte-MG [Relatório] 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021
6. KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. (1984) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Inc., Florida.
7. KORNDORFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Ed.) Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.355-374.
8. MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Ceres, 1980.
9. MILANEZ, B; LOSEKANN, C. 2016. Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição. Rio de Janeiro: Folio Digital: Letra e Imagem.
10. PILON-SMITS, E. *Phytoremediation*. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v.56, p.15-39, 2005.
11. ROONGTANAKIAT, Nualchavee. *Vetiver phytoremediation for heavy metal decontamination*. PRVN Tech. Bull, v. 1, 2009.



12. RENGEL, Zed. *Plant responses to soil-borne ion toxicities*. In: *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*. Academic Press, 2023. p. 665-722.
13. TAMBUNAN, J. A. M.; EFFENDI, H.; KRISANTI, M. *Phytoremediating Batik Wastewater Using Vetiver Chrysopogon zizanioides (L)*. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 27, n. 3, 2018.
14. TAVARES, V. E. Q. et al. Manejo de Irrigação. In: TIMM, L.C. (Org.) Manejo da irrigação na cultura do pessegueiro: Manual Técnico. Pelotas, Editora da Universidade Federal de Pelotas, 2007. p. 63-110.
15. VIMALA, Yerramilli et al. *Vetiver grass environmental model for rehabilitation of iron overburden soil: an ecosystem service approach*. *National Academy Science Letters*, v. 45, n. 2, p. 185-190, 2022.