

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES POR MACRÓFITAS CULTIVADAS COM LIXIVIADO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS⁽¹⁾

Pedro Alexandre Varella Escosteguy⁽²⁾, Jackson Berticelli Cerini⁽³⁾,
Deise Gobbi⁽³⁾, Delton Gobi⁽⁴⁾ & Catiane Maria Cecconello⁽⁵⁾

RESUMO

A absorção de nutrientes por plantas tem sido utilizada para remoção de íons em solos ou outros meios contaminados. Neste trabalho, avaliou-se a capacidade de extração de nutrientes das macrófitas taboa (*Typha* sp.) e junco (*Eleocharis* sp.), cultivadas em monocultivo e consorciadas, em meio contendo brita e lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos. O cultivo foi em caixas de madeira, contendo brita e lixiviado, em estufa plástica, durante cinco meses. Foram avaliados os teores e as quantidades extraídas, por planta e por área, de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) das macrófitas, além da produção de matéria seca e população de plantas. Essas variáveis foram determinadas na parte aérea das plantas, coletada em cinco cortes, efetuados uma vez por mês. Em geral, os teores e as quantidades extraídas de nutrientes, por planta e por área, não variaram entre o monocultivo e o consórcio, exceto as quantidades extraídas por área de P, K e Zn, que foram maiores no consórcio. A extração de macronutrientes foi maior na taboa e decresceu na ordem: K > N > Ca > P ~ Mg > S (taboa) e K > N > P ~ Ca ~ Mg ~ S (junco), e a de micronutrientes, na ordem: Mn > Fe > Zn > Cu. A quantidade extraída de K foi 648 (taboa) e 159 kg ha⁻¹ (junco), enquanto a de Mn foi de 6,6 (taboa) e 1,4 kg ha⁻¹ (junco). As quantidades de nutrientes extraídas variaram de acordo com o teor deles na parte aérea e a produção de matéria seca das macrófitas, sendo secundária a importância da população de plantas, em ambos os tipos de cultivo. A quantidade de nutrientes extraídos do lixiviado pela taboa foi expressiva, principalmente de K, N e Mn.

Termos de indexação: poluição do solo, nutrição vegetal, descontaminação ambiental.

⁽¹⁾ Financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs). Processo: 04/0676.5. Recebido para publicação em março de 2007 e aprovado em novembro de 2007.

⁽²⁾ Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo – UPF. Caixa Postal 611, CEP 99001-970 Passo Fundo (RS). E-mail: escosteguy@upf.br.

⁽³⁾ Acadêmico do Curso de Agronomia, UPF. Bolsista de Iniciação Científica da Fapergs. E-mail: jabcerini@yahoo.com.br; deisegobbi@yahoo.com.br

⁽⁴⁾ Professor do Curso de Química, UPF. E-mail: deisegobbi@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Química, Mestre em Engenharia, UPF. E-mail: catice@ibest.com.br

SUMMARY: NUTRIENT EXTRACTION BY MACROPHYTES CULTIVATED IN A SOLID WASTE LANDFILL LEACHATE

Plant nutrient extraction has been used to remove inorganic ions from soil or other polluted media. In this study, the nutrient extraction capacity of the macrophytes Typha sp. and Eleocharis sp., cultivated as monoculture and as consortium, was evaluated in a growing medium containing rubble and leachate of an urban landfill. The plants were grown in wooden boxes containing rubble and leachate as substrate, in a plastic greenhouse, for five months. The total concentration and amount of macro (N, P, K, Ca, Mg, S) and micronutrients (Fe, Mn, Cu, and Zn), extracted per plant and per area, the dry matter production and the plant density were evaluated. These variables were analyzed in the plant shoots in five harvests (once a month). In general, the nutrient concentrations and amounts, extracted per plant and per area, did not differ between the monoculture and the consortium, except for the amounts of P, K, and Zn extracted per area, which were higher in the consortium. A higher quantity of macronutrients was extracted by Typha sp. than by Eleocharis sp. The macronutrients decreased in the following quantitative order: $K > N > Ca > P \sim Mg > S$ (Typha sp.) and $K > N > P \sim Ca \sim Mg \sim S$ (Eleocharis sp.), and the micronutrients as follow: $Mn > Fe > Zn > Cu$. The extracted amount of K was 648 (Typha sp.) and 159 kg ha⁻¹ (Eleocharis sp.), and of Mn 6.6 (Typha sp.) and 1.4 kg ha⁻¹ (Eleocharis sp.). The amount of extracted nutrients (per plant and per area) was related to the nutrient contents and dry matter production, but poorly related to plant density, both in monoculture and consortium. The nutrient quantity extracted from the leachate by Typha sp. was high, mainly for K, N, and Mn.

Index terms: soil pollution, plant nutrition, environmental decontamination.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de tratamento de lixiviado de aterros sanitários geram efluentes que, em geral, necessitam de pós-tratamento. Entre outros objetivos, o pós-tratamento visa manter os teores de N, P, e de outros elementos e substâncias químicas compatíveis com os padrões ambientais de emissão de efluentes. As macrófitas são plantas que crescem em ambientes de transição entre sistemas aquáticos e terrestres e que produzem quantidades expressivas de matéria seca, com elevado teor de nutrientes (Ferreira et al., 2003; Mazzola, 2005; Mannarino et al., 2006). Essas características favorecem o uso dessas plantas para reduzir a concentração de íons inorgânicos de líquidos contaminados (Hussar, 2001). O uso de macrófitas no pós-tratamento de efluentes tem sido favorecido também pelo baixo custo e simplicidade (Haberl, 1999), sendo realizado tanto em sistemas naturais como em leitos construídos (Gopal, 1999). Os leitos cultivados naturais (*wetlands*) ocorrem em solos alagados, em áreas de baixa declividade, com água acumulada na superfície do solo, temporária ou intermitente. Os leitos construídos, por sua vez, são ecossistemas artificiais que reproduzem as características de banhados naturais, utilizando plantas aquáticas e substratos (brita, areia, casca de arroz, etc.), com o objetivo de tratar ou pós-tratar efluentes, combinando processos biológicos, químicos e físicos (Gopal, 1999; Haberl, 1999; Anjos, 2003).

Tradicionalmente, as macrófitas têm sido sugeridas para o tratamento de efluentes industrial ou sanitário; entretanto, mais recentemente, essas plantas têm sido propostas para o pós-tratamento de lixiviado de aterros sanitários (Bulc et al., 1997; Campos, 1999; Ferreira et al., 2003; Fleck, 2003; Mannarino et al., 2006). Dentre as vantagens atribuídas a esse uso das macrófitas, destaca-se o tratamento simultâneo de várias substâncias no local do aterro, a baixa produção de lodo, o longo tempo de vida útil do sistema de tratamento, a alta remoção de íons e a produção de biomassa vegetal (Mannarino et al., 2006). Entre as macrófitas mais utilizadas no pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário, destacam-se a taboa (*Typha* sp.) e o junco (*Eleocharis* sp.). A taboa é adaptada a solos alagados e sedimentos e produz grande quantidade de biomassa (Ferreira et al., 2003). O junco apresenta crescimento vegetativo vigoroso, especialmente em solos alagados com águas contaminadas, formando intensa vegetação e dominando as outras plantas no seu habitat (Mazzola, 2005).

A concentração de íons, como nitratos e fosfatos, em efluentes líquidos gerados no tratamento do lixiviado de aterro sanitário pode ser baixa, em relação à demanda das macrófitas cultivadas nesse meio. Como esses íons são imprescindíveis para a produção de biomassa e, conseqüentemente, para o desenvolvimento das macrófitas, a eficiência dessas plantas no pós-tratamento de efluentes está

diretamente relacionada à capacidade de absorção e de extração de nutrientes (Campos, 1999). Isso pode ocorrer, embora o teor desses íons, nesses líquidos, geralmente, seja maior que os limites máximos permitidos pelos órgãos ambientais para emissão de efluentes em cursos de água. Em geral, a capacidade de extração de nutrientes das macrófitas aumenta com o crescimento dessas plantas (Roston & Mansor, 1999). Além da extração de nutrientes, essas plantas estimulam a atividade de microrganismos, que são decompositores de compostos orgânicos, favorecendo os processos de nitrificação ou desnitrificação nos efluentes, o que ocorre desde a fase inicial de cultivo (Ottová et al., 1997; Valentim, 1999).

A eficiência das macrófitas em remover P e N varia de acordo com o tipo de efluente. Estudo efetuado com esgoto doméstico mostrou maior remoção de N total por junco (*Eleocharis fistulosa*) que por taboa (*Typha dominguensis* e *Typha latifolia*) (Roston & Mansor, 1999), enquanto a remoção de ortofosfato foi maior com as espécies de taboa (Mansor, 1998). Por outro lado, em leitos com águas residuárias de criação de suínos, esta última espécie não foi eficiente em remover P, ocorrendo o contrário na remoção de N total (Hussar, 2001; Tobias, 2002). Quando cultivada em leito com brita e águas residuárias de reator anaeróbio, a eficiência da taboa em remover P desse efluente foi de 25 % (Mazzola, 2005). Embora essa eficiência seja considerada baixa, ela foi maior que a do junco, o que coincide com o observado por Roston & Mansor (1999).

Trabalhos realizados em clima tropical e que avaliaram a eficiência das macrófitas em tratar lixiviados de aterros sanitários mostram que, em geral, a absorção de N é bastante expressiva (Ferreira et al., 2003; Fleck, 2003; Pires et al., 2003; Cecconello, 2005; Mannarino et al., 2006). Nesses trabalhos, a taboa foi a macrófita predominante, sendo considerada eficiente para decrescer o teor de N, mas com menor capacidade de remover P do lixiviado.

Além do teor de nutrientes do efluente, outros aspectos influenciam o crescimento das macrófitas. O corte da parte aérea dessas plantas favorece o crescimento, aumentando a quantidade de íons removidos dos efluentes tratados. Como a maioria das macrófitas cresce ao longo de todo o ano, isso facilita a implantação dessa estratégia. A eficiência das macrófitas em remover íons de efluentes depende também do tipo de espécie e de cultivo utilizado. Embora o monocultivo seja predominantemente empregado, sistemas com várias espécies (consórcio) podem ser mais eficientes, pois cada tipo de macrófita responde de forma diferente às variações dos contaminantes e, assim, aumenta a eficiência desse sistema, em distintas épocas do ano (Campos, 1999).

Em geral, a avaliação da eficiência das macrófitas em remover íons inorgânicos do lixiviado de aterro sanitário tem sido baseada na comparação da concentração destes íons, determinados antes e após

a retenção desse líquido em leitos cultivados (Mansor, 1998; Gopal, 1999; Roston & Mansor, 1999; Hussar, 2001; Anjos, 2003; Ferreira et al., 2003; Fleck, 2003; Cecconello, 2005; Mannarino et al., 2006). Por outro lado, o conhecimento das exigências nutricionais e do acúmulo de nutrientes na parte aérea das macrófitas, em especial da taboa e do junco, cultivados com lixiviado de aterro sanitário, é importante para explicar a eficiência dessas plantas. Da mesma forma, o efeito do consórcio sobre a eficiência de extração de nutrientes desse meio deve ser conhecido. Este trabalho teve como objetivo avaliar o teor e a quantidade de nutrientes absorvidos pela taboa e pelo junco, cultivados em sistema de monocultivo e consorciados, em leitos com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em estufa plástica (PVC, 200 µm de espessura), na Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, em Passo Fundo, RS, entre agosto de 2005 e março de 2006. Nesse município, a altitude é de 687 m e o clima é do tipo subtropical úmido. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com duas repetições. Os tratamentos testados foram o monocultivo de taboa (*Typha* sp.) e o de junco (*Eleocharis* sp.) e o consórcio dessas duas espécies. As unidades experimentais consistiram de leitos (caixas) de madeira (MDF), com dimensões de 1,85 m (comprimento) x 0,7 m (altura e largura). Os leitos foram impermeabilizados com manta de PVC (2 mm de espessura) e preenchidos com britas (55 a 90 mm de diâmetro) e com lixiviado. Esse líquido foi coletado no tanque de retenção do aterro de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo, na localidade de São João da Bela Vista.

Após a coleta das macrófitas em campo, as mudas foram lavadas com água corrente, para retirada da lama e outras impurezas, e, em seguida, cortadas, para que a altura do caule fosse de 20 cm. Foram transplantadas 21 mudas de cada espécie, nos leitos destinados aos sistemas de monocultivo, e 11 mudas de cada espécie, nos leitos destinados ao consórcio. As mudas foram adaptadas nos leitos, com água, até a emissão dos brotos, quando foram adicionados 15 L de lixiviado (5 % do volume utilizado), em cada leito. Após uma semana de adaptação das mudas, estas foram cultivadas exclusivamente com o lixiviado do aterro, até o término do experimento. A adição do lixiviado aos leitos foi efetuada por um sistema de tubos (PVC de 75 mm), com furos de 10 mm de diâmetro, espaçados de 100 em 100 mm e declividade de 1 %, existente na parte frontal e superior dos leitos. Esse sistema foi conectado a dois reservatórios (PVC) de 1 m³, dos quais o lixiviado era direcionado para os leitos. A vazão de entrada desse líquido nas unidades experimentais foi ajustada, para que o tempo de

retenção do lixiviado no leito fosse de cinco dias. Após esse período, o lixiviado era retirado dos leitos, sendo isso efetuado por um sistema de tubos, localizado na parte final e inferior dos leitos. As características desse sistema correspondem às mesmas do utilizado para adição desse líquido nos leitos. Durante o período do experimento, o lixiviado foi repostado nos reservatórios, semanalmente, após ser coletado no tanque de retenção do aterro. Antes da adição aos leitos, esse líquido foi analisado, de acordo com o descrito em APHA (1998) e Tedesco et al. (1995). Os teores médios obtidos nas análises do lixiviado foram (em mg L⁻¹): 435 de N total; 57 de N-NO₃; 10,54 de P; 517 de K; 29,20 de Ca; 24,10 de Mg; 8,61 de Fe; 0,43 de Mn; 0,23 de Zn; 0,03 de Cu; 0,0 de S; e 596 de Cl. Os valores de outras características químicas desse líquido foram: pH, 8,15; condutividade elétrica, 4,79 mS cm⁻¹; DBO, 1.861 mg L⁻¹; e DQO, 5.352 mg L⁻¹.

A parte aérea das plantas foi cortada em cinco épocas, a cada quatro semanas, para análise do teor total de: N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe e matéria seca (MS). Antes dos cortes da parte aérea, foi determinado o número de plantas por leito, contando todas as plantas, sem distinguir os colmos das emissões laterais (brotos) da muda originalmente transplantada. A parte aérea dos cinco cortes foi seca em estufa, com circulação forçada de ar, a 70 °C, até peso constante, obtendo-se a MS. No último corte, as raízes foram coletadas, sendo separadas das britas, por peneiramento, lavadas com água destilada e seca em estufa (70 °C), até peso constante. Não foi possível coletar parte das raízes, devido à grande proporção disseminada no meio de cultivo e ao volume desse. Como, ainda, uma pequena fração foi perdida no peneiramento, optou-se por não considerar a biomassa dessa parte das plantas. Após a secagem da parte aérea e das raízes, o material foi moído em moinho tipo Willey, com peneira de 0,5 mm, para posterior determinação dos nutrientes. Os teores de N, P, K, Ca e Mg foram extraídos por digestão com ácido sulfúrico, e os de S, Fe, Mn, Zn e Cu, por digestão nitroperclórica. O teor de N foi determinado em destilador micro-Kjeldahl; o de P, por espectrometria visível; o de K, por fotometria de chama; o de S, por turbidimetria; e os de Ca, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu, por espectrofotometria de absorção atômica (Tedesco et al., 1995). A quantidade de nutrientes extraída pela parte aérea das plantas foi determinada considerando a MS e o teor de nutrientes, obtidos nessa parte da planta, em cada corte. A quantidade de nutrientes extraída por área cultivada foi determinada considerando a quantidade deles na parte aérea, a população de plantas e a área do leito de cultivo.

Os resultados obtidos em cada época de corte foram utilizados para estimar a média dos cortes, correspondente às amostras coletadas em cada unidade experimental. As médias foram submetidas à análise da variância e os tratamentos comparados com contrastes ortogonais a 5 %, utilizando o pacote estatístico CoStat.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de nutrientes na parte aérea e nas raízes

O teor de macro e micronutrientes na parte aérea das macrófitas, em geral, não variou ($p > 0,05$) entre os sistemas de cultivo, exceto os de N e de Ca, que foram maiores no monocultivo (contraste 1; Quadro 1). Por outro lado, constataram-se diferenças no teor de nutrientes entre as espécies de macrófitas (contrastes 2 e 3; Quadro 1); em geral, a taboa apresentou maior teor de N, K, Ca, Mg e Mn, enquanto o junco, no sistema de monocultivo, apresentou maior teor de Zn e de Cu.

O teor de nutrientes das raízes, em geral, não variou entre os tratamentos testados, o que, em parte, se deve aos maiores coeficientes de variação obtidos nesses resultados, principalmente para os teores de N, para Ca e S (Quadro 2). Em geral, o teor de macronutrientes das raízes foi menor que o da parte aérea, ocorrendo o contrário com os micronutrientes. Essas diferenças podem estar relacionadas com a maior translocação de macronutrientes da raiz para a parte aérea, além da menor produção de MS das raízes, o que contribui para a concentração dos micronutrientes nessa parte da planta (Marschner, 1995; Malavolta, 2006).

Entre os macronutrientes, o K foi o que mais se concentrou na parte aérea (30,0 a 53,4 g kg⁻¹; Quadro 1), sendo cerca de seis a sete vezes maior que na raiz (6,0 a 8,2 g kg⁻¹; Quadro 2). Por sua vez, o teor de Fe detectado na raiz (1.325 a 1.393 mg kg⁻¹) foi elevado, sendo cerca de oito vezes maior que o encontrado na parte aérea (164 a 172 mg kg⁻¹) (Quadros 1 e 2). Esses resultados estão relacionados com a composição química do lixiviado, que contém maior concentração de K (516,5 mg L⁻¹) em relação aos outros nutrientes analisados e, entre os micronutrientes, maior concentração de Fe (8,6 mg L⁻¹) e de Cl (596,2 mg L⁻¹).

Independentemente do sistema de cultivo, os teores dos macronutrientes na MS da parte aérea da taboa decresceram na ordem: K > N > Ca > P > Mg > S. No junco, os teores decresceram na ordem: K > N > P > Ca ~ Mg ~ S. Por outro lado, os teores dos micronutrientes, em ambas as macrófitas, decresceram na ordem: Mn > Fe > Zn > Cu (Quadro 1). Assim, o macronutriente com maior teor na parte aérea foi o K, seguido do N, enquanto entre os micronutrientes foi o Mn. Esse maior teor deste micronutriente pode estar relacionado com a maior teor de Fe, em relação aos teores dos outros micronutrientes da raiz, já que a absorção desses metais pelas plantas é antagônica (Marschner, 1995; Malavolta, 2006).

Comparando a faixa de teor de macronutrientes, obtido na parte aérea das macrófitas (Quadro 1), com a média destes na MS de várias plantas (Marschner,

Quadro 1. Contrastes calculados com os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, cobre, manganês e ferro, extraídos da parte aérea de macrófitas cultivadas com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos

Contraste ⁽¹⁾	N	p ⁽²⁾	P	p	K	p	Ca	p	Mg	p
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	11,9 x 11,3	0,0197	3,5 x 3,4	0,7836	43,0 x 38,9	0,0551	5,0 x 3,9	0,0105	2,4 x 2,0	0,0765
2) T-Co x J-Co	11,7 x 11,0	0,1383	3,5 x 3,3	0,0519	47,9 x 30,0	0,0004	6,6 x 1,3	0,0001	2,7 x 1,4	0,0029
3) T-Mo x J-Mo	12,6 x 11,1	0,0382	3,4 x 3,5	0,1789	53,4 x 32,6	0,0004	7,6 x 2,3	0,0001	3,0 x 1,8	0,0054
CV (%)	4,0		2,5		3,8		4,4		8,0	
	S	p	Zn	p	Cu	p	Mn	p	Fe	p
	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	1,1 x 1,2	0,8679	39,5 x 41,6	0,6197	10,6 x 10,5	0,7692	393,6 x 399,3	0,8953	168,1 x 166,1	0,8818
2) T-Co x J-Co	1,1 x 1,2	0,5454	33,9 x 49,2	0,0389	9,1 x 11,9	0,0254	516,3 x 282,3	0,0069	165,1 x 167,2	0,8496
3) T-Mo x J-Mo	1,0 x 1,2	0,3670	36,9 x 42,0	0,3120	11,2 x 10,0	0,2324	509,0 x 278,2	0,0046	164,0 x 172,4	0,8654
CV (%)	19,7		12,2		7,7		9,4		11,2	

⁽¹⁾ T-Mo, J-Mo, T-Co e J-Co, respectivamente, taboa e junco, dos tratamentos com monocultivo e com consórcio. ⁽²⁾ p: nível de significância.

Quadro 2. Contrastes calculados com os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, cobre, manganês e ferro, extraídos de raízes de macrófitas cultivadas com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos

Contraste ⁽¹⁾	N	p ⁽²⁾	P	p	K	p	Ca	p	Mg	p
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	4,9 x 5,2	0,8638	3,1 x 2,8	0,0999	6,6 x 7,4	0,4022	5,9 x 7,3	0,4062	1,2 x 1,4	0,1764
2) T-Co x J-Co	6,2 x 4,1	0,3201	2,8 x 2,8	0,9716	8,2 x 6,6	0,9394	8,5 x 6,2	0,3458	1,4 x 1,3	0,7633
3) T-Mo x J-Mo	5,3 x 4,6	0,7185	2,7 x 3,5	0,0221	7,1 x 6,0	0,2272	6,5 x 5,3	0,5980	1,3 x 1,2	0,3956
CV (%)	34,4		5,9		14,1		31,6		7,3	
	S	p	Zn	p	Cu	p	Mn	p	Fe	p
	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	0,5 x 0,9	0,4776	60,2 x 61,6	0,3408	29,2 x 35,0	0,4543	748,0 x 954,1	0,1312	1.330,5 x 1.388,8	0,7619
2) T-Co x J-Co	1,0 x 0,8	0,2576	62,7 x 60,5	0,5163	34,4 x 35,6	0,2083	955,1 x 953,2	0,4378	1.392,6 x 1.384,9	0,2409
3) T-Mo x J-Mo	0,6 x 0,5	0,2413	68,7 x 51,6	0,6563	34,0 x 34,4	0,9595	620,43 x 875,6	0,0309	1.336,4 x 1.324,6	0,2678
CV (%)	34,4		19,8		21,6		10,2		3,0	

⁽¹⁾ T-Mo, J-Mo, T-Co e J-Co, respectivamente, taboa e junco, dos tratamentos com monocultivo e com consórcio. ⁽²⁾ p: nível de significância.

1995; Malavolta, 2006), constata-se que as macrófitas concentraram mais K e P, em detrimento de menor teor de N e Ca (junco); já os teores dos demais nutrientes foram semelhantes aos de outras plantas. Os teores de K nas macrófitas variaram de 30,0 a 53,4 g kg⁻¹ (Quadro 1), sendo cerca de três (junco) a cinco (taboa) vezes maiores que o teor médio em plantas

(10 g kg⁻¹). Os teores de P, por sua vez, situaram-se em cerca de 3 g kg⁻¹ (Quadro 1), sendo cerca de 50 % maiores que o teor médio em plantas (2 g kg⁻¹). Por outro lado, os teores de N e Ca foram cerca de 50 % menores que os teores médios em plantas (15 e 5 g kg⁻¹, respectivamente). Os teores de micronutrientes, por sua vez, foram maiores nas macrófitas em relação

aos teores médios de diversas espécies, relatados por Marschner (1995) e Malavolta (2006). As maiores diferenças foram observadas com o Mn (taboa) e o Fe, cujos teores foram cerca de 10 vezes maiores que as médias de diversas plantas (50 e 10 mg kg⁻¹, respectivamente). Isso evidencia a capacidade das macrófitas avaliadas em extrair íons de interesse ambiental, como P, Mn, Fe, Zn e Cu, do lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos.

Quantidades de nutrientes extraídos por planta

Como observado com os teores de nutrientes da parte aérea (Quadro 1), as quantidades acumuladas de macro e micronutrientes, obtidas na média dos cortes, em geral, não variaram entre os sistemas de cultivo (contraste 1; Quadro 3). Por outro lado, a quantidade de nutriente extraída pela parte aérea das macrófitas variou com a espécie vegetal (contrastes 2 e 3; Quadro 3). A taboa absorveu maior quantidade de nutrientes, o que foi verificado nos dois sistemas de cultivo – isso se deve ao maior teor de nutrientes, em geral, observada na MS da parte aérea desta espécie (Quadro 1) e à maior quantidade de MS produzida por ela. A produção de MS dessa macrófita (179,3 e 307,2 mg/planta, no consórcio e monocultivo, respectivamente) foi cerca de duas vezes maior que que a do junco (66,5 e 130,7 mg/planta, no consórcio e monocultivo, respectivamente) (Contrastes 2 e 3; Quadro 3).

As quantidades de nutrientes acumuladas na parte aérea da taboa foram expressivamente maiores que as observadas no junco. No sistema de consórcio, esse acúmulo foi de 17 (Zn) a 121 (Ca) vezes maior, enquanto no monocultivo foi de 21 (S) a 82 (Ca) vezes maior (contraste 3; Quadro 3). Os resultados também

indicam que a taboa, em ambos os sistemas de cultivos avaliados, apresenta alto potencial para extrair íons de interesse ambiental (N, P, Zn, Cu, Mn e Fe).

As quantidades extraídas de nutrientes pela parte aérea das macrófitas decresceram na mesma ordem observada no teor destes na MS. Nos dois sistemas de cultivo, as quantidades de macronutrientes extraídas pela taboa decresceram na ordem: K > N > Ca > P > Mg > S, enquanto a extração pelo junco decresceu na ordem: K > N > P ~ Ca > Mg ~ S (Quadro 3). Isso também ocorreu com os micronutrientes, que decresceram na ordem: Mn > Fe > Zn > Cu, em ambas as macrófitas (Quadro 3). Assim, o K e o Mn foram o macro e o micronutriente, respectivamente, mais extraídos pela parte aérea das macrófitas. Como eles também foram os nutrientes com maior teor na MS (Quadro 1); isso evidencia a influência dessa característica das espécies de macrófitas na determinação da quantidade de íons extraídos do lixiviado.

Quantidade de nutrientes extraídos por área

A população de plantas por área do junco (cerca de 398 e 765 plantas m⁻², no consórcio e no monocultivo, respectivamente) foi aproximadamente 10 vezes maior que a da taboa (cerca de 44 e 72 plantas m⁻², no consórcio e no monocultivo, respectivamente), em ambas as formas de cultivo (contrastes 2 e 3; Quadro 4). Contudo, a taboa extraiu maior quantidade de nutrientes por área (contrastes 2 e 3; Quadro 4), o que se deve ao maior teor de nutrientes e de MS desta macrófita. Assim, essas características foram determinantes para a maior eficiência da taboa, compensando a menor população de plantas dessa espécie.

Quadro 3. Contrastes calculados com a quantidade extraída de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, cobre, manganês, ferro e matéria seca da parte aérea de macrófitas cultivadas com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos

Contraste ⁽¹⁾	N	p ⁽²⁾	P	p	K	p	Ca	p	Mg	p	S	p
	mg/planta		mg/planta		mg/planta		mg/planta		mg/planta		mg/planta	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	21,7 x 19,0	0,2284	5,9 x 5,8	0,1250	90,6 x 77,1	0,0493	12,8 x 10,4	0,4421	5,2 x 4,3	0,5830	1,8 x 1,9	0,1364
2) T-Co x J-Co	36,7 x 1,4	0,0002	11,1 x 0,4	0,0001	150,4 x 3,8	0,0001	20,6 x 0,2	0,0001	8,3 x 0,2	0,0005	3,6 x 0,2	0,0024
3) T-Mo x J-Mo	41,9 x 1,5	0,0002	11,4 x 0,5	0,0002	177,0 x 4,3	0,0001	25,2 x 0,3	0,0001	10,1 x 0,2	0,0004	3,4 x 0,2	0,0086
CV (%)	11,1		9,0		5,7		6,9		13,7		23,6	
	Zn	p	Cu	p	Mn	p	Fe	p	MS	p		
	µg/planta		µg/planta		µg/planta		µg/planta		mg/planta			
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	28,8 x 56,4	0,0496	19,2 x 15,1	0,3889	861,7 x 828,9	0,3112	282,9 x 270,0	0,2378	218,9 x 122,9	0,0414		
2) T-Co x J-Co	106,4 x 6,4	0,0002	28,7 x 1,5	0,0008	1621,3 x 36,4	0,0011	518,3 x 21,6	0,0025	179,3 x 66,5	0,0695		
3) T-Mo x J-Mo	52,1 x 5,6	0,0007	37,0 x 1,3	0,0011	1686,7 x 36,7	0,0013	543,1 x 22,7	0,0054	307,2 x 130,7	0,0183		
CV (%)	12,9		16,7		17,6		23,0		24,6			

⁽¹⁾ T-Mo, J-Mo, T-Co e J-Co, respectivamente, taboa e junco, dos tratamentos com monocultivo e com consórcio. ⁽²⁾ p: nível de significância.

Quadro 4. Contrastes calculados com a quantidade extraída por área de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, cobre, manganês e ferro e com a população de plantas (PP) de macrófitas cultivadas com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos

Contraste ⁽¹⁾	N	p ⁽²⁾	P	p	K	p	Ca	p	Mg	p	S	p
	g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²	
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	2,1 x 2,2	0,2284	0,6 x 0,7	0,0125	7,9 x 8,2	0,0493	1,0 x 1,0	0,4421	0,4 x 0,4	0,5830	0,2 x 0,2	0,1364
2) T-Co x J-Co	3,2 x 1,1	0,0002	1,0 x 0,3	0,0001	13,3 x 3,1	0,0001	1,8 x 0,1	0,0001	0,7 x 0,1	0,0005	0,3 x 0,1	0,0024
3) T-Mo x J-Mo	3,0 x 1,1	0,0002	0,8 x 0,4	0,0002	12,7 x 3,3	0,0001	1,8 x 0,2	0,0001	0,7 x 0,2	0,0004	0,2 x 0,1	0,0086
CV (%)	11,1		9,0		5,7		6,9		13,7		23,6	
	Zn	p	Cu	p	Mn	p	Fe	p	DP	PP		
	g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²		g m ⁻²		planta m ⁻²			
1) (T-Mo, J-Mo) x (T-Co, J-Co)	6,5 x 7,2	0,0496	1,8 x 1,9	0,3889	74,4 x 85,6	0,3112	28,1 x 31,4	0,2378	418,4 x 220,1	0,0463		
2) T-Co x J-Co	9,4 x 5,1	0,0002	2,5 x 1,2	0,0008	143,0 x 29,0	0,0011	45,7 x 17,2	0,0025	44,1 x 397,8	0,0225		
3) T-Mo x J-Mo	3,7 x 4,2	0,0007	2,6 x 1,0	0,0011	120,7 x 28,1	0,0013	38,9 x 17,4	0,0054	71,6 x 765,2	0,0021		
CV (%)	12,9		16,7		17,6		23,0		24,6			

⁽¹⁾ T-Mo, J-Mo, T-Co e J-Co, respectivamente, taboa e junco, dos tratamentos com monocultivo e com consórcio. ⁽²⁾ p: nível de significância.

Entre os macronutrientes, o K foi o mais extraído do lixiviado. A extração de K por área foi semelhante entre os dois tipos de cultivos, mas foi maior na taboa (cerca de 13 g m⁻²) que no junco (3 g m⁻²) (contrastes 2 e 3; Quadro 4). Essas quantidades de K foram cerca de quatro (taboa) e três (junco) vezes maiores que as extraídas de N, que foi o segundo nutriente mais extraído do lixiviado. Entre os micronutrientes, o Mn foi o mais extraído por aérea. A extração de Mn por área foi semelhante entre os dois tipos de cultivos, sendo maior na taboa (121 a 143 mg m⁻²) que no junco (cerca de 28 mg m⁻²) (contrastes 2 e 3; Quadro 4). Como verificado com o K e o Mn, as quantidades extraídas por área dos outros nutrientes foram semelhantes entre os sistemas de cultivo (Quadro 4), tendo sido maior na taboa. A maior eficiência dessa macrófita em remover íons do lixiviado coincide com o discutido anteriormente sobre a maior capacidade da taboa em acumular nutrientes e produzir MS na parte aérea (Quadros 1 e 3). Esses resultados corroboram o observado em outros trabalhos, que consideraram a taboa eficiente em remover nutrientes de efluentes líquidos (Hussar, 2001; Ferreira et al., 2003; Fleck, 2003; Pires et al., 2003; Cecconello, 2005; Mazzola, 2005; Mannarino et al., 2006). Isso pode estar relacionado com o grande volume interno observado nessa macrófita, que possibilita a transferência de O₂ para o sistema radicular, garantindo alta produção de MS, quando a taboa cresce em meios líquidos (Ferreira et al., 2003).

Ao contrário do observado com os outros nutrientes, a quantidade extraída por área de P, K e Zn variou com o sistema de cultivo, sendo maior no consórcio (contraste 1; Quadro 4). A maior extração desses nutrientes, nesse sistema, pode estar

relacionada com a maior capacidade de produção de biomassa e, conseqüentemente, de acúmulo de nutrientes, pois essa é considerada uma das vantagens do consórcio, quando ocorre variação na composição química do substrato, ao longo do tempo de cultivo (Campos, 1999); essa variação foi observada nas análises químicas do lixiviado, efetuadas ao longo do experimento.

Em ambos os sistemas de cultivo, as quantidades extraídas de nutrientes por área decresceram na mesma ordem observada com o teor e as quantidades acumuladas na parte aérea das macrófitas (contrastes 1 e 2; Quadro 4). Assim, o K e o Mn foram o macro e o micronutriente, respectivamente, mais extraídos por área cultivada. Os resultados indicam o maior potencial da taboa, em ambos os sistemas de cultivos avaliados, para extrair íons de interesse ambiental. Por outro lado, as menores extrações de P em relação às de N corroboram os relatos que indicam menor eficiência da taboa em remover P de efluentes líquidos (Hussar, 2001; Tobias, 2002; Cecconello, 2005; Mazzola, 2005).

Com base nas quantidades de nutrientes extraídas por área (Quadro 4), foi estimada a capacidade de extração das macrófitas por 1,0 ha, ao longo dos cinco meses de cultivo (total acumulado nos cinco cortes). Nessa estimativa foram utilizados os valores da média do monocultivo e do consórcio. Assim, estimou-se que as quantidades de macronutrientes, extraídas pela parte aérea do junco e da taboa, correspondem, respectivamente, a: 159 e 648 kg ha⁻¹ de K; 56 e 156 kg ha⁻¹ de N; 9 e 90 kg ha⁻¹ de Ca; 17 e 44 kg ha⁻¹ de P; 8 e 36 kg ha⁻¹ de Mg; e 6 e 14 kg ha⁻¹ de S. Por sua vez, as quantidades de micronutrientes extraídas por essas macrófitas foram estimadas em,

respectivamente: 1.427 e 6.593 g ha⁻¹ de Mn; 864 e 2.115 g ha⁻¹ de Fe; 232 e 454 g ha⁻¹ de Zn; e 56 e 130 g ha⁻¹ de Cu. As quantidades de K (648 kg ha⁻¹) e de Ca (90 kg ha⁻¹) extraídas com a taboa foram expressivamente maiores que as conhecidas para algumas plantas de grãos e com ciclo curto (quatro meses), como a soja, o feijão e o milho, cultivadas em solos agrícolas. Além de evidenciar a grande demanda desses nutrientes dessa macrófita, isso também indica a alta eficiência da taboa em remover nutrientes ou íons de interesse ambiental, presentes no lixiviado de aterros de resíduos sólidos.

CONCLUSÕES

1. As quantidades extraídas de N, Ca, Mg, S, Cu, Mn e Fe pela taboa e pelo junco, em meio com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos, não variam entre o monocultivo e o consórcio dessas macrófitas. No entanto, o consórcio proporciona maior extração de P, K e Zn do lixiviado.

2. A capacidade de extração de nutrientes da taboa é maior que a do junco, em ambas as formas de cultivo. A taboa apresenta elevada capacidade de remoção de nutrientes do lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos, principalmente de K e N, entre os macronutrientes, e de Mn, entre os micronutrientes.

LITERATURA CITADA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. Standard methods for examination of water and wastewater. 20.ed. Washington, 1998.
- ANJOS, J.A.S.A. Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (wetland) no controle da poluição por metais pesados: O caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. 301p. (Tese de Doutorado)
- BULC, T.; VRHOVSEK, D. & KUKANJA, V. The use of constructed wetland for landfill leachate treatment. *Water Sci. Technol.*, 35:301-306, 1997.
- CAMPOS, J.R., coord. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. São Carlos, PROSABE-FINEP, 1999. 435p.
- CECCONELLO, C.M. Pós-tratamento de lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos utilizando leitos cultivados. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2005. 149p. (Tese de Mestrado)
- FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C.; RITTER, E. & MANNARINO, C.F. Wetland: Resultados no tratamento do chorume do aterro sanitário de Pirai-RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., Rio de Janeiro, 2003. Anais. Joinville, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. p.1-10.
- FLECK, E. Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 290p. (Tese de Mestrado)
- GOPAL, B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. *Water. Sci. Technol.*, 40:27-35, 1999.
- HABERL, R. Constructed wetlands: A chance to solve wastewater problems in developing countries. *Water. Sci. Technol.*, 40:11-17, 1999.
- HUSSAR, G.J. Avaliação do desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias de suinocultura. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 118p. (Tese de Mestrado)
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição de plantas. São Paulo, Ceres, 2006. 638p.
- MANNARINO, C.F.; FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C. & RITTER, E. Wetland para tratamento de lixiviados de aterros sanitários – experiências no aterro sanitário de Pirai e no aterro metropolitano de Gramacho. *Eng. Sanitária Amb.*, 11:108-112, 2006.
- MANSOR, M.T.C. Uso de leito de macrófitas no tratamento de águas residuárias. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 106p. (Tese de Mestrado)
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1995. 889p.
- MAZZOLA, M. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 9:276-283, 2005.
- OTTOVÁ, V.; BALCAROVÁ, J. & VYMAZAL, J. Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Sci. Technol.*, 35:117-123, 1997.
- PIRES, J.C.A.; FERREIRA, J.A.; RITTER, E.; CAMPOS, J.C. & MANNARINO, C.F. Projeto experimental de tratamento do chorume produzido no aterro metropolitano de Gramacho através de wetland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., Rio de Janeiro, 2003. Anais. Joinville, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. v.2, Tomo III, p.342-354.
- ROSTON, D.M. & MANSOR, M.T.C. Tratamento de esgoto por sistema de leitos cultivados de vazão sub-superficial: Avaliação da remoção de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., Rio de Janeiro, 1999. Anais. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. p.519-524.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- TOBIAS, A.C.T. Tratamento de resíduos da suinocultura: Uso de reatores anaeróbios sequenciais seguidos de leitos cultivados. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 125p. (Tese de Doutorado)
- VALENTIM, M.A.A. Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 119p. (Tese de Mestrado)