

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

EFEITOS DA APLICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO ENRIQUECIDO COM CÁDMIO E ZINCO NA CULTURA DO ARROZ⁽¹⁾

Clarice de Oliveira⁽²⁾, Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho⁽²⁾,
Valter dos Santos Marques⁽³⁾ & Nelson Mazur⁽²⁾

RESUMO

A utilização do lodo de esgoto, como fonte de nutrientes para as plantas, pode ser limitada pela presença de metais, que podem causar contaminação no solo, nos aquíferos e nas plantas. Lodo de esgoto urbano produzido na Estação de Tratamento da Ilha do Governador (ETIG), Rio de Janeiro (RJ), foi enriquecido com 1.667 mg kg⁻¹ de Cd e 8.000 mg kg⁻¹ de Zn e, após 20 dias de incubação, sob umidade constante (50 % g g⁻¹), foi utilizado em doses de 0, 20, 40 e 80 t ha⁻¹, em amostras de dois solos: Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) e Argissolo Vermelho-Amarelo (PV). Para avaliar o efeito do Cd e do Zn no crescimento de arroz (IAC-47) foi feito um experimento em casa de vegetação, durante 126 dias, com amostras dos solos LV e PV incubadas com o lodo de esgoto enriquecido. Adotou-se um delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. Foram coletados raízes, folhas e grãos e determinados a produção de matéria seca e teores de Cd e Zn. As elevadas doses de Cd e Zn aplicadas no solo, decorrentes da aplicação do lodo de esgoto, não mostraram efeito na produção de matéria seca; nas plantas, os metais concentraram-se nas raízes, com baixa translocação para as folhas. Os níveis de Cd e de Zn encontrados na planta inteira demonstraram a tolerância da variedade de arroz IAC-47 a elevadas teores de Cd e Zn.

Termos de indexação: metais pesados, contaminação do solo, *Oryza sativa*.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Seropédica (RJ). Recebido para publicação em junho de 2001 e aprovado em dezembro de 2004.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. CEP 23850-000 Seropédica (RJ). E-mail: coliveira@ufrj.br

⁽³⁾ Professor da Escola Agrotécnica Federal de Ceres - EAFCE-GO. CEP 76300-000 Ceres (GO). E-mail: lau@kitshop.com.br

SUMMARY: *EFFECTS OF THE APPLICATION OF CADMIUM AND ZINC-ENRICHED SEWAGE SLUDGE ON RICE*

The presence of heavy metals can restrict the use of sewage sludge as a source for plant nutrients since they may contaminate soil, aquifers and plants. Urban sewage sludge from the Treatment Station of Ilha do Governador (ETIG), Rio de Janeiro, Brazil, was enriched with 1.667 mg kg⁻¹ Cd and 8.000 mg kg⁻¹ Zn. After 20 days of incubation under a constant humidity of 50% (g g⁻¹), doses of 0, 20, 40 and 80 t ha⁻¹ were applied to two soil samples (red-yellow Latosol (LV) and red-yellow Argisol (PV)). A greenhouse experiment evaluated the effect of Cd and Zn on the growth of rice (IAC-47) during 126 days in the samples of both soils incubated with the enriched sewage sludge. A complete randomized block design was used with four replications. Plant roots, straw and grains and their respective biomass (dry matter) and Cd and Zn concentrations were evaluated at harvest. The high Cd and Zn doses applied to the soil did not affect plant growth but the plant roots showed high Cd and Zn concentrations as a consequence of the low transference of these elements to the spouts. The Cd and Zn levels found in the whole plant demonstrate a high tolerance of the rice variety IAC-47 to these elements.

Index terms: heavy metals, soil contamination, Oryza sativa.

INTRODUÇÃO

As previsões de aumento populacional, associadas à crescente concentração urbana mundial, determinaram a necessidade imediata de definições tecnológicas e de ações políticas para solucionar o grave problema para a destinação final do lodo de esgoto. Esta preocupação tem gerado um estímulo mundial não só sobre práticas de minimização da produção de resíduos, mas também sobre a priorização da reciclagem como opção de destino final. Uma alternativa considerada bastante viável para a destinação do lodo de esgoto tem sido a reciclagem agrícola (Andreoli & Pegorini, 1999). Os lodos de esgoto são, geralmente, materiais ricos em matéria orgânica, macronutrientes e micronutrientes, sendo, por isso, considerados como fertilizantes valiosos para muitas culturas (Alloway & Jackson, 1991).

A principal limitação do uso do lodo de esgoto na agricultura tem sido, em geral, a presença de metais pesados potencialmente tóxicos. A concentração de metais pesados no lodo depende da atividade, do desenvolvimento urbano e industrial da área que abastece a estação de tratamento. A adição de grandes quantidades de lodo de esgoto em aterros sanitários e na reciclagem agrícola pode levar à situação de solos altamente contaminados com metais pesados.

Os metais pesados, quando aplicados aos solos, podem acumular e persistir por longos períodos de tempo e podem, além de fitotóxicos, ser prejudiciais a processos microbianos vitais na ciclagem de nutrientes (McGrath et al., 1994). A entrada na cadeia alimentar tem sido, também, motivo de grande preocupação (Mesquita, 2002).

Existem mecanismos de tolerância das plantas a concentrações elevadas de metais pesados, tais como: restrição no transporte da raiz para a folha; acumulação nos tricomas; exudatos que podem complexar os metais; tipo de ligação entre o metal e o componente da parede celular; produção de compostos intracelulares com propriedades quelatantes; bombeamento ativo para os vacúolos. Estes mecanismos podem ocorrer, isolada ou simultaneamente, conferindo maior tolerância ao estresse causado pela presença desses metais (Steffens, 1990; Wang & Evangelou, 1994).

Este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição de Cd e Zn em plantas de arroz crescidas em solos que receberam lodo de esgoto enriquecido com esses metais.

MATERIAL E MÉTODOS

O lodo de esgoto utilizado foi coletado na Estação de Tratamento da Ilha do Governador (ETIG), Rio de Janeiro (RJ). A coleta foi feita em uma pilha de lodo tratado que tinha sido previamente misturada e depositada no pátio de armazenamento da ETIG, sendo retiradas amostras simples do topo, meio e base da pilha de lodo, formando uma amostra composta (ABNT, 1985).

Após secagem, o lodo foi passado por peneira de malha de 2 mm e efetuada análise com digestão nitroperclórica (Moraes & Rabelo, 1986). Análises químicas mostraram que o lodo apresentou as seguintes características: pH em água (1:2,5) = 7,0; C_{org} = 186; N_{total} = 21,5; MO = 335; P = 8,0; K = 1,8; Ca = 25 e Mg = 5 g kg⁻¹ e Cu = 47; Cd = 0,75; Pb = 82; Mn = 60 e Zn = 217 mg kg⁻¹.

O enriquecimento do lodo consistiu na adição, em solução, de sulfato de cádmio e acetato de zinco. Após a adição das soluções, as amostras de lodo enriquecidas foram homogeneizadas, incubadas e mantidas em condições de umidade constante (50 g g^{-1}), por um período de 20 dias. Após o período de incubação, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm, sendo, posteriormente, adicionadas aos solos (Oliveira et al., 2003a). As concentrações finais de Cd e Zn, após o enriquecimento do lodo, foram de 1.667 e 8.000 mg kg^{-1} , respectivamente.

Utilizaram-se amostras superficiais (0–20 cm) de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) e de um Argissolo Vermelho-Amarelo (PV). As amostras dos solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm. A caracterização dos atributos físicos e químicos dos solos (Quadro 1) foi feita de acordo com o Manual de Métodos e Análise de Solos (Embrapa, 1997).

Nas amostras de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) do LV e do PV, foram adicionadas doses de lodo enriquecido em quantidades equivalentes a 0, 20, 40 e 80 t ha^{-1} , com o propósito de obter, na dose de 80 t ha^{-1} , concentrações de Cd e Zn superiores às estabelecidas por legislações e regulamentações, em solos agrícolas tratados com lodo, nos países da Comunidade Comum Européia que consistem de 3 e 300 mg kg^{-1} , para Cd e Zn, respectivamente (McGrath et al., 1994). Após a adição do lodo ao solo, as amostras foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos, em umidade equivalente à capacidade de campo, durante 90 dias.

Neste estudo, no cálculo das doses de lodo aplicado são referidas a massa de solo da camada arável de um hectare a 15 cm de profundidade e a densidade do solo de $1,00 \text{ g cm}^{-3}$. Os valores de pH, carbono orgânico e os teores de Cd e Zn atingidos,

nos dois solos, pela adição das diferentes doses de lodo, são mostrados no quadro 2. Os teores totais de Cd e Zn foram determinados utilizando-se 1 g de solo, previamente pulverizado em almofariz de ágata, e aquecido em banho-maria ($95 \text{ }^\circ\text{C}$), por 1 hora, com uma mistura de 3 mL de HNO_3 (65 %) e 2 mL de HCl (30 %). As extrações, usando o extrator Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$), consistiram em agitar, horizontalmente, por uma hora, 5 g de solo com 50 mL da solução extratora. Após a extração, procedeu-se à filtragem. Os teores de Cd e Zn presentes nos extratos foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, usando o aparelho VARIAN-AA600.

Após 90 dias de incubação dos solos, foi instalado o experimento em casa de vegetação, sendo as unidades experimentais constituídas por vasos plásticos que continham 5 kg de solo com lodo de esgoto enriquecido. Utilizou-se, como planta-teste ($6 \text{ plantas vaso}^{-1}$), o arroz (*Oryza sativa* L.), cultivar IAC-47. Todos os tratamentos receberam calagem (equivalente a 4 t ha^{-1}) e uma adubação básica na época do plantio com os seguintes nutrientes em solução: 100 mg kg^{-1} de K e 82 mg kg^{-1} de P, na forma de KH_2PO_4 ; 200 mg kg^{-1} de N, na forma de uréia. Após aplicação do calcário, o pH em água variou de 5,0 a 5,4, no LV, e de 5,4 a 5,7, no PV. O N foi aplicado em forma fracionada, sendo 100 mg kg^{-1} no plantio, 50 mg kg^{-1} no início do perfilhamento e 50 mg kg^{-1} no início da floração. Após 126 dias, quando os grãos se encontravam maduros, colheram-se, separadamente, folhas, raízes e grãos, que, depois de secos em estufa de circulação forçada de ar ($60 \text{ }^\circ\text{C}$), foram pesados, moídos e analisados para Cd e Zn.

Os teores de Cd e Zn, no material vegetal, foram obtidos a partir da digestão nitroperclórica (Moraes & Rabelo, 1986) e a determinação por espectrofotometria de absorção atômica.

Quadro 1. Atributos físicos e químicos das amostras do Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) e do Argissolo Vermelho Amarelo (PV), antes do cultivo, coletadas na camada superficial de 0-20cm de profundidade

Solo	pH _{H₂O}	C _{org.}	N _{Total}	C/N	P ⁽²⁾	Ca	Mg	K	Al	CTC ⁽¹⁾	V	
	1:2,5	— g kg ⁻¹ —			mg kg ⁻¹	————— cmol _c kg ⁻¹ —————				%		
LV	4,4	14,0	2,0	7,0	7	1,0	1,8	0,3	2,0	14,3	22	
PV	4,6	9,2	1,4	6,6	1	1,7	1,3	0,1	0,5	5,8	54	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	Argila	Areia	Silte	Ki	Kr	Classe Textural	Mineralogia da fração argila
	————— % —————					————— g kg ⁻¹ —————						
LV	18,6	15,5	10,0	2,88	2,43	550	350	100	2,04	0,50	Argila	Caulinita, Gibbsita e Goethita
PV	17,4	13,7	7,7	1,88	2,79	430	470	100	2,15	0,55	Franco argilosa	Caulinita, Gibbsita e Goethita

⁽¹⁾ Extraído com acetato de cálcio. ⁽²⁾ Extraído com HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$.

Quadro 2. Valores de pH, carbono orgânico e teores totais e extraídos com Mehlich-1 (M1) de cádmio e zinco nos solos LV e PV, tratados com as doses de 0, 20, 40 e 80 t ha⁻¹ de lodo de esgoto enriquecido com Cd e Zn

Dose	LV						PV					
	pH	Corg.	Cd		Zn		pH	Corg.	Cd		Zn	
			Total ⁽¹⁾	M1	Total	M1			Total ⁽¹⁾	M1	Total ⁽¹⁾	M1
t ha ⁻¹	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹				g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹			
0	4,0	10,5	0,7	0,0	29,1	3,5	4,7	6,9	0,0	0,0	27,5	4,5
20	4,2	16,8	22,7	4,9	158,3	101,5	4,5	7,5	18,3	5,2	154,6	111,0
40	4,3	21,0	39,2	10,2	259,5	198,0	4,7	12,3	35,0	9,8	238,1	203,0
80	4,4	22,8	84,4	21,9	569,1	378,5	5,0	13,5	79,4	20,6	506,9	347,0

⁽¹⁾ Extração com solução nitroperclórica.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com os tratamentos em arranjo fatorial (4 x 2), ou seja, com quatro doses de lodo (0; 20; 40; 80 t ha⁻¹ de lodo), duas unidades de solos (LV e PV).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 %. Utilizou-se o programa Estatístico SAEG Versão 5.0, desenvolvido pela Fundação Arthur Bernardes e pela UFV, Viçosa (MG).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de matéria seca

O quadro 3 apresenta os resultados da produção de matéria seca das folhas, grãos, raízes e total das plantas de arroz, nos solos LV e PV tratados com doses crescentes de lodo de esgoto enriquecido com Cd e Zn.

A aplicação do lodo aumentou a produção de matéria seca das folhas, grãos e raiz. Doses maiores do que 20 t ha⁻¹ não resultaram, porém, em aumentos significativos na produção de matéria seca. Constatou-se, com esses resultados, nos dois solos, que as quantidades de Cd e Zn nas doses mais elevadas de lodo de esgoto, 40 e 80 t ha⁻¹, não provocaram redução na produção de matéria seca das plantas.

Comparando a produção de matéria seca total nos dois solos, verificou-se que, de maneira geral, em todas as doses aplicadas ou mesmo na ausência de lodo, esta se manteve superior no solo LV. Esta diferença, provavelmente, deveu-se às diferenças nas características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade entre estes solos, afetando o crescimento das plantas. Os maiores teores de argila, de óxidos e de matéria orgânica presentes no solo LV (Quadro 1), provavelmente, permitiram que uma quantidade maior de Cd fosse adsorvida

Quadro 3. Produção de matéria seca das folhas, grãos, raízes e total do arroz (IAC-47), cultivado em amostras de solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
g vaso ⁻¹				
Folha				
LV	176,83 b ⁽¹⁾	267,96 a	270,20 a	298,46 a
PV	96,07b	170,06 a	187,83 a	192,73 a
Grão				
LV	135,00b	178,66 a	167,86 a	298,46 a
PV	84,10a	100,20 a	98,13 a	192,73 a
Raiz				
LV	55,03b	71,10 ab	79,60 a	73,47 a
PV	17,33c	33,80 b	41,27 a	54,93 a
Total				
LV	366,83b	517,73 a	517,66 a	557,29 a
PV	197,46b	304,06 a	334,46 a	332,83 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

especificamente, diminuindo a disponibilidade e os riscos de toxidez desses elementos para as plantas, quando comparadas com as crescidas no solo PV (Marques, 1997; Oliveira et al., 2003a).

Teor e acúmulo de Cd pelas plantas de arroz

As concentrações de Cd (mg kg⁻¹) nas folhas, grãos e raízes do arroz, cultivado nos solos LV e PV, sob condições de casa de vegetação, são apresentados no quadro 4. No solo LV, observou-se, de modo geral, que o teor de Cd nas folhas, grãos e raízes aumentou

sensivelmente até à dose de 20 t ha⁻¹ de lodo, especialmente nas raízes, tendendo à estabilização nas doses mais elevadas.

Esses resultados demonstram que o teor de Cd absorvido pelas plantas não foi proporcional às quantidades de Cd adicionadas ao solo, indicando que com o aumento da dose de lodo houve maior imobilização do elemento no solo. Este fenômeno pode estar associado à presença de compostos inorgânicos no lodo capazes de adsorver metais, conforme descrito por Oliveira et al. (2003ab), que observaram que compostos de Fe e Mn reduzíveis com hidroxilamina são capazes de imobilizar metais pesados.

Os teores elevados de Cd nas raízes das plantas, variando de 144,10 mg kg⁻¹ (na dose de 20 t ha⁻¹) a 231,00 mg kg⁻¹ na maior dose de lodo (80 t ha⁻¹), no solo LV, comparados aos de outros órgãos (Quadro 4), indicam que as raízes atuaram como um filtro natural, limitando a passagem deste elemento para a parte aérea. No solo PV, os teores de Cd nas folhas e raízes foram superiores aos do solo LV; entretanto, nos grãos foram inferiores. Comparando as doses de lodo de 20 e 80 t ha⁻¹, verificou-se que com o incremento da dose de lodo, os teores de Cd aumentaram em 23 % nas folhas, embora sem alcançar diferença significativa, e em 58 % nas raízes, similar ao solo LV, enquanto nos grãos tendeu a diminuir. Esses resultados confirmam que, nos dois solos, as raízes contribuíram para a retenção deste elemento na planta. O mecanismo de retenção de metais pelas raízes das plantas tem sido mencionado na literatura (Kabata-Pendias & Pendias, 1992; Mesquita, 2002). No solo PV, que

Quadro 4. Concentrações de Cd nas folhas, grãos e raízes do arroz IAC-47, cultivado nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
	mg kg ⁻¹			
	Folha			
LV	0,00 b ⁽¹⁾	40,04 a	52,69 a	55,44 a
PV	0,00 b	183,15 a	197,78 a	224,84 a
	Grão			
LV	0,00 c	59,80 b	61,60 ab	63,80 a
PV	0,00 b	25,00 a	20,60 a	20,10 a
	Raiz			
LV	0,00 c	144,10 b	226,60 a	231,00 a
PV	0,00 c	272,80 b	282,70 b	427,90 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

apresentou os maiores teores de Cd nas raízes, o Cd transferido das raízes para a parte aérea acumulou-se, principalmente nas folhas, tendo sido pequena a translocação para as sementes. Já no caso do solo LV, onde o teor de Cd das folhas foi muito menor do que no solo PV, os teores de Cd nos grãos foram similares aos das folhas.

Deve-se ressaltar que, diferentemente do que menciona a literatura (Alloway, 1995; Kabata-Pendias & Pendias, 1992), mesmo na dose mais baixa de lodo (20 t ha⁻¹), os teores de Cd das plantas superaram 50 mg kg⁻¹, sem afetar sensivelmente o crescimento. Teores muito superiores ao considerado normal (0,1 a 2,4 mg kg⁻¹) foram observados, podendo-se inferir que a toxidez do elemento não depende apenas dos teores do elemento nos tecidos das plantas, mas também do balanço de nutrientes. Para vários autores (Kabata-Pendias & Pendias, 1992; Alloway, 1995), elementos como Ca²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺ e H₂PO₄⁻ interagem com o Cd de forma que este elemento diminui sensivelmente sua atividade na planta.

Analisando o acúmulo de Cd nas diferentes partes da planta, observou-se que, no solo LV (Quadro 5), o teor de Cd em todos os órgãos, nos tratamentos que receberam lodo, variou de 3,07 a 5,26 mg vaso⁻¹. O Cd total acumulado na planta, no entanto, teve considerável aumento na dose de 20 t ha⁻¹ em relação à testemunha, seguido por aumentos menos

Quadro 5. Acúmulo de Cd nas folhas, grãos, raízes e total do arroz IAC-47, cultivado nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
	mg vaso ⁻¹			
	Folha			
LV	0,05 b ⁽¹⁾	3,23 a	4,15 a	4,90 a
PV	0,05 b	9,06 a	11,59 a	12,20 a
	Grão			
LV	0,05 b	3,20 a	3,11 a	3,55 a
PV	0,05 b	0,73 a	0,63 a	0,53 a
	Raiz			
LV	0,05 c	3,07 b	5,26 a	4,88 a
PV	0,05 c	2,70 b	3,36 ab	6,98 a
	Total			
LV	0,05 c	9,51 b	12,52 a	13,33 a
PV	0,05 c	12,50 b	15,58 ab	19,71 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

acentuados nas doses mais elevadas. No solo PV (Quadro 5), o acúmulo de Cd foi muito maior nas folhas, seguido pelas raízes e, em menor extensão, nos grãos. Neste solo, a quantidade total de Cd acumulada pela planta nas doses de 20 e 80 t ha⁻¹ foi de 12,50 e 19,71 mg vaso⁻¹, respectivamente, e nas raízes, de 2,70 e 6,98 mg vaso⁻¹, respectivamente, para as mesmas doses de lodo aplicadas.

A relação de Cd acumulado na parte aérea/raiz permaneceu aproximadamente constante com valores próximos de 1,8 para o solo LV, indicando maior acumulação de Cd na parte aérea (folhas + grãos) do que nas raízes (Quadro 6). Entretanto, para o solo PV, a relação entre o Cd acumulado na parte aérea/ raiz tendeu a decrescer sensivelmente com o aumento de lodo aplicado no solo (Quadro 6). Esses resultados demonstram que grande parte do Cd absorvido acumulou-se nas raízes, sobretudo nas doses mais elevadas de lodo. Comparando a dose de 20 t ha⁻¹ com a de 80 t ha⁻¹, no solo PV, verificou-se uma redução dessa relação à metade na dose mais alta. Teores maiores de Cd nas raízes, nas doses mais elevadas, podem ter sido consequência do desencadeamento de algum mecanismo de tolerância a Cd nas raízes, como, por exemplo, a exudação de substâncias quelantes, por meio de ligação do metal às cargas existentes na parede celular, conforme indicado por Wang & Evangelou (1994).

A relação Cd acumulado nos grãos/folha diminuiu com o aumento da dose de lodo aplicado nos dois solos (Quadro 6), demonstrando que houve uma pequena transferência de Cd da folha para os grãos. No caso do solo PV, onde o acúmulo de Cd pelas plantas foi sensivelmente maior do que no solo LV, os resultados mostram, claramente, que a transferência de Cd das folhas para os grãos foi muito pequena.

A ação dos mecanismos de tolerância por meio da transferência de metais das folhas mais novas

Quadro 6. Relação de Cd acumulado na parte aérea/raiz e nos grãos/folha na planta do arroz IAC-47, cultivado nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
mg vaso ⁻¹				
Parte aérea/raiz				
LV	0,00 c ⁽¹⁾	2,11 a	1,39 b	1,88 a
PV	0,00 c	3,86 a	3,77 a	2,02 b
Grãos/folha				
LV	0,00 b	1,02 a	1,11 a	0,75 a
PV	0,00 a	0,08 a	0,05 a	0,13 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

para as mais velhas, reduzindo a transferência para os grãos, poderia estar atuando (Wang & Evangelou, 1994). Outro mecanismo que poderia explicar esse comportamento seria o da complexação de Cd na parede celular, exudação de substâncias, alteração da estrutura e permeabilidade da membrana, produção de compostos intracelulares com propriedades quelantes e bombeamento desses elementos para os vacúolos (Wang & Evangelou, 1994).

A alta tolerância dessa variedade de arroz a Cd, juntamente com o acúmulo nas folhas, permite sugerir estudos dessa espécie/variedade com fins de fitorremediação, principalmente quando se necessita de uma “limpeza rápida” da camada superficial de solos contaminados com Cd (Adriano et al., 1995; Keltjens et al., 1998).

Concentração e acúmulo de Zn pelas plantas de arroz

Os teores de Zn nas folhas, grãos e raízes de arroz, de plantas crescidas nos solos LV e PV, são apresentados no quadro 7. Observa-se que, no solo LV, a concentração de Zn nas folhas aumentou significativamente até à dose de 40 t ha⁻¹ de lodo (792,11 mg kg⁻¹ de Zn), mantendo-se praticamente constante na dose mais elevada de lodo.

Nos grãos, a concentração de Zn no solo PV variou de 20,1 (na dose de 80 t ha⁻¹ de lodo) a 25 mg kg⁻¹ (dose de 20 t ha⁻¹ de lodo) e, no caso de solo LV, os teores foram muito mais elevados e variáveis (89 a 613,58 mg kg⁻¹) do que no solo LV. A concentração de Zn foi maior nas folhas, seguida pelas raízes e, em extensão menor, nos grãos, com exceção feita ao teor de Zn dos grãos no solo LV, que, na dose de

Quadro 7. Concentrações de Zn nas folhas, grãos e raízes do arroz IAC-47, cultivado nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
mg kg ⁻¹				
Folha				
LV	0,00 c ⁽¹⁾	698,61 b	792,11 a	802,56 a
PV	104,72 b	1208,35 a	992,31 a	854,95 a
Grão				
LV	43,04 b	613,58 a	89,09 b	251,84 b
PV	0,00 b	25,00 a	20,60 a	20,10 a
Raiz				
LV	0,00 c	396,66 b	634,92 a	572,88 a
PV	98,34 c	720,28 ab	634,37 b	838,31 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

aplicação de lodo de 20 t ha⁻¹, superou até à concentração de Zn das raízes do mesmo tratamento, para o qual ainda não se tem uma explicação definitiva. Comparando as concentrações de Zn nos tratamentos de 20 e 80 t ha⁻¹, verificou-se que, nas folhas, ocorreu um aumento de 15 % nas plantas crescidas no solo LV ou manteve-se estável no solo PV, enquanto, nas raízes, o aumento foi sensivelmente maior, indicando que, embora o Zn seja móvel dentro da planta, a raiz continuou atuando como "barreira" deste elemento, diminuindo a possibilidade de toxidez da planta, destacando-se como um eficiente mecanismo de tolerância dessa variedade de arroz, conforme discutido anteriormente para o Cd.

De acordo com vários autores (Wang & Evangelou, 1994; Steffens, 1990), no citoplasma da célula ocorre a complexação do metal (Zn) com ácidos orgânicos (citrato) e inorgânicos (H₂S), fitatos e fitoquelatinas. Todos esses compostos formados são armazenados nos vacúolos na forma menos tóxica para a planta.

No solo LV, os teores totais de Zn, nos tratamentos de 20 e 80 t ha⁻¹ de lodo, foram de 158,3 e 569,1 mg kg⁻¹ (Quadro 2), respectivamente. Uma diferença equivalente a cerca de 228 %, a qual não se traduziu nas plantas de arroz que apresentaram teores médios de Zn de 764 mg kg⁻¹.

Analisando a acumulação de Zn nas diferentes partes da planta (Quadro 8), verificou-se que com a aplicação de lodo de esgoto a quantidade de Zn acumulada pela planta aumentou significativamente nos dois solos, ocorrendo o maior acúmulo nas folhas, especialmente no solo LV. Marques (1997), avaliando o parâmetro índice de colheita de Zn (fração do total de Zn da planta acumulado nos grãos) dessas plantas, mencionou que, nas doses mais elevadas de lodo, ocorreu menor translocação de Zn para as sementes, acumulando-se principalmente nas folhas.

Esses resultados são mais bem visualizados, quando são analisados tanto as relações de Zn acumulado na parte aérea/ raízes como o acúmulo de Zn nos grãos/folha (Quadro 9).

Observou-se que, enquanto no solo PV houve um decréscimo significativo na relação de acumulação de Zn parte aérea/raiz com o aumento da dose de lodo aplicada, no solo LV, a influência da dose aplicada não mostrou efeito consistente; na dose de 80 t ha⁻¹, a relação diminuiu em 27 %, quando comparada à dose de 20 t ha⁻¹. Comportamento similar foi observado na relação entre Zn acumulado nos grãos /folha, e, neste caso, os valores foram inferiores aos da relação de acumulação de Zn parte aérea/raiz.

Os resultados dessas relações demonstraram que, nas doses mais elevadas de lodo enriquecido, ocorreu menor transferência do Zn acumulado nas raízes para a folha e desta para os grãos, justificando, desta forma, a redução do acúmulo e da concentração de

Quadro 8. Acúmulo de Zn nas folhas, grãos, raízes e total na planta de arroz IAC-47, cultivado nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
mg vaso ⁻¹				
Folha				
LV	0,30 c ⁽¹⁾	56,19 b	64,01 ab	71,84 a
PV	2,89 b	64,13 a	57,69 a	47,39 a
Grão				
LV	1,75 b	32,96 a	4,67 b	13,90 b
PV	5,58 a	5,90 a	2,15 a	2,57 a
Raiz				
LV	0,30 c	8,46 b	14,69 a	12,49 a
PV	0,48 c	7,57 b	8,23 b	13,81 a
Total				
LV	1,75 b	97,61 a	83,36 a	98,23 a
PV	8,94 b	77,60 a	68,07 a	63,77 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

Quadro 9. Relação de Zn acumulado na parte aérea/ raiz e nos grãos/folha na planta do arroz IAC-47 cultivado, nos solos LV e PV, considerando as doses de lodo em casa de vegetação

Solo	Dose (t ha ⁻¹)			
	0	20	40	80
mg vaso ⁻¹				
Parte aérea/raiz				
LV	0,00 d ⁽¹⁾	10,51 a	4,64 c	7,70 b
PV	18,72 a	9,43 a	8,69 a	3,83 b
Grãos/folha				
LV	0,00 b	0,60 a	0,07 b	0,19 b
PV	2,95 a	0,11 a	0,04 a	0,07 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas iguais, nas linhas, para cada órgão, não diferem significativamente, a 5 %, pelo Teste Tukey.

Zn nos grãos. A este respeito, vários autores têm mostrado que, em gramíneas, o Zn e o Cd acumulam-se mais nas raízes do que na parte aérea (Bingham, 1975; Adriano, 2002).

CONCLUSÕES

1. A aplicação de 20 t ha⁻¹ de lodo enriquecido com Cd e Zn nos solos PV e LV aumentou significativa-

mente a biomassa vegetal das plantas de arroz, que se manteve estável nas doses de 40 e 80 t ha⁻¹ de lodo e sem mostrar sintomas de toxidez.

2. Na planta de arroz (IAC-47), os metais pesados em estudo concentraram-se nas raízes, limitando a passagem destes elementos para a parte aérea.

3. As plantas de arroz mostraram-se tolerantes a teores elevados de Cd e Zn.

LITERATURA CITADA

- ANDREOLI, C.V. & PEGORINI, E.S. Plano de reciclagem agrícola de lodo de esgoto do município de Maringá. Curitiba, Sanepar, 1999. 100p.
- ADRIANO, D.C.; CHLOPECKA, A.; KAPLAN, D.I.; CLUSTERS, H. & VANGRONSVELD, J. Soil contamination and remediation: philosophy and remediation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, 3., Proceedings. Paris, 1995. p.465-499.
- ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. London, Blackie A & P, 1995. 368p.
- ALLOWAY, B.J. & JACKSON, A.P. The behaviour of heavy metals in sewage sludge amended soils. *Sci. Total Environ.*, 100:151-176, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Amostragem de resíduos sólidos. Projeto 1.6302-004. São Paulo, 1985.
- BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L.; MAHLER, R.J. & GANJE, T.J. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. *J. Environ. Qual.*, 4:207-211, 1975.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, CRC, 1992. 315p.
- KELTJENS, W.G. & van BEUSICHEM, M.L. Phytochelatins as biomarkers for heavy metal toxicity in maize: single metal effects of copper and cadmium. *J. Plant Nutr.*, 21:635-648, 1998.
- MARQUES V.S. Efeitos de zinco e cádmio em arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado com solução nutritiva e em solo tratado com lodo de esgoto enriquecido. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1997. 146p. (Tese de Mestrado).
- McGRATH, S.P. Long-term studies of metal transfers following application of sewage sludge. In: COUGHTREY, P.J.; MARTIN, M.H. & UNSWORTH, M.H., eds. Pollutant, transport and fate in ecosystems. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1987. p.301-317.
- McGRATH, S.P.; CHAUDRI, A.M. & GILLER, K.E. Long-term effects of land application of sewage sludge: Soils, microorganisms and plants. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., Acapulco, 1994. Proceedings. Acapulco, Mexico, July 10-16, 1994. p.517-533.
- MESQUITA, A.A. Remediação de áreas contaminadas por metais pesados provenientes de lodo de esgoto. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2002. 68p. (Tese de Mestrado)
- MORAES, J.F.V. & RABELO, N.A. Um método simples para a digestão de amostras de plantas. Goiânia, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, 1986. 10p.
- OLIVEIRA, C. Avaliação do potencial de contaminação de dois solos agrícolas com lodo de esgoto enriquecido com cádmio, chumbo e zinco. Seropédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. 191p. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, C.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. & MAZUR, N. Solubilidade de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto enriquecido. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:171-181, 2003a.
- OLIVEIRA, C.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; MAZUR, N. & SOARES, S.F. Solubilidade de cádmio y cinc en suelos agrícolas tratados con lodo residual. *R. Terra*, 21:351-363, 2003b.
- STEFFENS, J.C. The heavy metal-binding peptides of plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol.*, 41:553-75, 1990.
- WANG, J. & EVANGELOU, V.P. Metal tolerance aspects of plant cell wall and vacuole - handbook of plant and crop physiology. Tucson, The University of Arizona, 1994. 325p.