

FRANCIANNY MARIA DE PAULA SOUZA

**UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DE DIFERENTES LODOS GERADOS EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

FRANCIANNY MARIA DE PAULA SOUZA

**UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DE DIFERENTES LODOS GERADOS EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

APROVADA: 27 de Julho de 2011.

Pesq. Sandra P. P. Fonseca
(Coorientadora)

Prof Antônio Augusto Neves

Prof. Raphael B. A. Fernandes
(Presidente da Banca)

AGRADECIMENTOS

A Deus e a São Judas Tadeu por ter me concedido esta oportunidade.

Aos meus pais, Angela e Geraldo, que mesmo diante das dificuldades não mediram esforços para a realização do nosso sonho. Sou imensamente grata a educação e a constante preocupação dispensada por vocês.

Aos meus irmãos, Kamilla e Pedro Henrique, pelo incentivo. A distância não impediu que eu tivesse vocês como exemplos na minha vida.

A meu noivo, Regimar, por toda a contribuição nos seus dias de descanso. Por estar sempre disposto a me ajudar e acalmar. A sua família, pelo grande apoio.

A Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Solos pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

Ao professor Maurício Paulo Ferreira Fontes pela orientação, apoio e atenção em todos os momentos.

Aos co-orientadores, professor Raphael Bragança Alves Fernandes e pesquisadora Sandra Parreiras Pereira Fonseca, pela orientação, paciência e presteza.

A estagiária Cileimar Aparecida da Silva, pela amizade e cooperação.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial a Luciana, Cláudio, Carlinhos, Sr. Fernando, Sr. Cardoso, Roberto, e Pedro Lelis, pelo trabalho realizado com muito empenho.

Aos professores: Júlio Neves, Igor e Antônio Augusto.

Ao laboratorista, José Francisco Dias, pela amizade, ensinamentos e convivência durante esses anos.

Ao CNPq e a CAPES pelas bolsas concedidas.

Aos amigos e companheiros da pós-graduação, Fernanda Shulthais, Maria das Graças, Cecília, Manuel, Aline e Evair, que muito contribuíram para o meu aprendizado durante este curso.

A COPASA, em especial a Divisão de Tratamento de Esgoto – DUTE na pessoa do Dr. José Maria Oliveira Filho, pela preocupação e incentivo a pesquisas com foco ambiental.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

BIOGRAFIA

Francianny Maria de Paula Souza, filha de Angela Maria de Paula Souza e Geraldo Altaizo de Souza, nasceu em 19 de julho de 1985, na cidade de Conselheiro Lafaiete – MG.

Ingressou na Universidade Federal de Viçosa em 2001, onde cursou o Ensino Médio no Colégio de Aplicação – COLUNI. Em 2004 iniciou sua graduação em Engenharia Ambiental, vindo a concluí-la em janeiro de 2009.

Em agosto de 2009 ingressou no programa de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, oferecido pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2011.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	4
2.1. Coleta e preparação da amostra	4
2.1.1. Solo	4
2.1.2. Lodos de esgoto.....	4
2.2. Caracterização das amostras	4
2.2.1. Solo	4
2.2.2. Lodos de esgoto.....	7
2.3. Adsorção.....	8
2.4. Instalação e condução do experimento.....	9
2.4.1. Solo.....	9
2.4.2. Planta.....	9
2.4.3. Análise estatística.....	10
2.5. Reagentes e soluções	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1. Caracterização do solo	11
3.2. Caracterização dos lodos de esgoto.....	11
3.3. Adsorção individual de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn	13
3.4. Adsorção competitiva de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn.....	21

3.5. Efeito da aplicação de doses crescentes de lodo nas características químicas e físicas do solo	24
3.6. Efeito da aplicação de lodo na produção de matéria seca de milho.....	30
3.7. Efeito da aplicação de lodo na concentração de micronutrientes e metais pesados na planta	31
3.8. Efeito da aplicação de lodo na concentração de metais pesados nos solos	37
4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO.....	43
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
6. APÊNDICE.....	49

RESUMO

SOUZA, Francianny Maria de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Utilização agrícola de diferentes lodos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto.** Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-Orientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes e Sandra Parreiras Pereira Fonseca.

Objetivando avaliar o efeito da aplicação dos lodos Vespasiano, Morro Alto, Nova Pampulha e Vila Maria na qualidade do solo e no desenvolvimento vegetal de plantas de milho foi realizado um experimento em casa de vegetação. Contudo, este estudo foi precedido por um ensaio de adsorção individual e competitiva dos metais Cd, Ni, Pb, Cr, Mn e Zn com o intuito de avaliar a capacidade máxima de adsorção e prever o comportamento destes elementos quando presentes nos solos enriquecidos com lodo. O ensaio de adsorção individual foi realizado utilizando soluções com concentrações crescentes dos metais, variando de 0 a 4 mmol L⁻¹ preparadas em NaNO₃ e ajustadas a pH 5,5±0,2. O ensaio de adsorção competitiva baseou-se na proporção das concentrações médias dos metais presentes nos lodos. As soluções foram preparadas em NaNO₃ e ajustadas a pH 4,0±0,2. Previamente ao ensaio em casa de vegetação, foi realizada a caracterização do solo e dos lodos. Pela caracterização dos lodos, constatou-se que os metais Cr e Pb apresentaram menores taxas de extração por DTPA. O experimento foi disposto em blocos casualizados e os tratamentos seguiram o fatorial 2[(4x6) - 3], em que foram utilizados dois tipos de solos com textura distinta, quatro tipos de lodos aplicados em seis doses (0; 10; 25; 50; 75; 100 t ha⁻¹), sendo que a dose zero foi testada apenas uma vez para cada solo. Foram utilizados vasos de 3 dm³ e os lodos foram aplicados superficialmente aos solos e incubados por vinte dias. Ao final da incubação semeou-se três sementes de milho em cada vaso e ao 20º dia foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas em cada vaso até o 45º dia. Após o cultivo foram avaliados na planta a produção de matéria seca e o acúmulo de elementos tóxicos (Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn). No solo foram realizadas análises de rotina e extração por DTPA de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn. Os dados foram analisados estatisticamente por meio do teste F, desdobramento da interação solo x lodo x dose e teste de Tukey. Em relação à produção de matéria seca verificou-se que apenas os resultados obtidos para o lodo Vila Maria não se mostraram significativos. Observou-se, ainda, que a disponibilidade dos metais Pb, Ni e Cr foi maior para o solo arenoso e que em geral, os efeitos da adição dos lodos sobre as características químicas dos solos foi melhor observado no solo argiloso. Com base na análise dos efeitos da aplicação dos lodos sobre os metais pesados nos solos, constatou-se que a carga acumulada dos metais Pb e Zn restringiu o número máximo de aplicações dos resíduos aos solos.

ABSTRACT

SOUZA, Francianny Maria de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Agricultural use of sludge generated at different Sewage Treatment Plants.** Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-Advisers: Raphael Bragança Alves Fernandes and Sandra Parreiras Pereira Fonseca.

By intending to evaluate the application effect of sewage sludge Vespasiano, Morro Alto, Nova Pampulha and Vila Maria to rate soil quality and the development of corn plantation, an experiment in greenhouse was carried out. However, this study was preceded by an experiment of individual and competitive adsorption of Cd, Ni, Pb, Cr, Mn e Zn in order to evaluate the maximum capacity of adsorption and foretell the behavior of these elements when present in sewage sludge-rich soils. The experiment of individual adsorption was carried out by using solutions with increasing concentration of metals, ranging from 0 to 4 mmol L⁻¹ prepared in NaNO₃ and adjusted to pH 5,5±0,2 and the experiment of competitive adsorption was based on the proportion of metal average concentration present in sewage sludge. The solutions were prepared in NaNO₃ and adjusted to pH 4,0±0,2. Previous to the experiment in greenhouse, the characterization of the soil and sewage sludge were evaluated. According to the sewage sludge characterization, it was verified that Cr and Pb present lower levels of extraction by DTPA. The experiment was displayed in randomized blocks and the treatments were according to the factorial 2[(4x6) - 3], in which it was used two kinds of soils with distinct texture and four kinds of sewage sludge applied in six doses (0; 10; 25; 50; 75; 100 t ha⁻¹), on the condition that dose 0 was tested only one time on each soil. It was used vases with a capacity of 3 dm³ and sewage sludge were superficially applied to the soil and incubated for 20 days. By the end of the incubation period, three corn seeds were planted in vases and on the twentieth day thinning, keeping two plants in each vase until the fortieth day. After the cultivation, the plant production of dry matter and the accumulation of toxic elements (Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn) were evaluated. On the soil, routine analyses and extraction by DTPA were conducted. The data were statistically analyzed through F test, unfolding of interaction soil x sewage sludge x dose and by Tukey's test. In relation to the production of dry matter it could be observed that the results obtained for Vila Maria sewage sludge did not show significance. It was also observed that the availability of Pb, Ni e Cr was greater for sandy soil and in general, the effect of sewage sludge addition on the soil chemical characteristics was better observed on clay soils. Based on the analysis of application effects of sewage sludge in heavy metals, it could be concluded that the accumulation of metals (Pb and Zn) restrained the maximum number of applications of residue to the soil.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado processo de urbanização aliado ao crescimento industrial dos grandes centros urbanos fez com que o consumo por recursos hídricos aumentasse cada vez mais. Nesse sentido, surgiu uma grande preocupação com as questões ambientais, especialmente no que se refere ao saneamento básico.

Segundo dados disponibilizados pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, os índices médios nacionais de atendimento da população urbana foram de 95,2 % para abastecimento de água, 52 % para coleta de esgoto e 37,9 % para tratamento de esgoto (BRASIL, 2009). Como forma de amenizar este problema, tem sido criadas políticas públicas de incentivo à implantação de sistemas de saneamento.

Contudo, com a ampliação da coleta e dos sistemas de tratamento de esgoto, um novo problema ambiental é gerado: a disposição final do lodo. O lodo de esgoto é um resíduo usualmente líquido ou semi-sólido, apresentando em média de 0,25 a 12 % de teor seco, composto principalmente por metais e bactérias responsáveis pela digestão do esgoto. A quantidade de lodo produzida por uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é afetada principalmente pela eficiência do tratamento, enquanto a qualidade do lodo depende especialmente da fonte geradora e do tipo de tratamento utilizado (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008; JORDÃO e PESSÔA, 2005; MOTA, 2000; SOUZA et al., 2008).

O lodo de esgoto pode ser classificado em lodo primário e lodo secundário. O lodo primário é composto pelos sólidos removidos por sedimentação durante o tratamento primário, e o lodo secundário compreende a biomassa de microrganismos gerada em função da remoção de matéria orgânica dos esgotos (CASSINI et al., 2003).

Quando tratado e processado, o lodo recebe o nome de biossólido e possui características que permitem sua utilização agrícola de forma ambientalmente segura (BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006). O termo biossólido foi criado no final da década de 80, nos Estados Unidos, com o objetivo de evitar o preconceito e atrair a atenção dos agricultores para a sua utilização (LUDUVICE, 1998).

No Brasil, a disposição final do lodo é geralmente o aterro sanitário. Além do alto custo, que pode chegar a 50 % do custo operacional de uma ETE, a disposição deste resíduo no aterro pode causar graves problemas operacionais, ambientais e sanitários (PIRES, 2006).

Alternativas de disposição que têm sido utilizadas incluem além da deposição em aterro, a aplicação no solo e a incineração (SANCHEZ MONEDERO et al., 2004). Na Europa 37 % dos lodos produzidos têm sido utilizados na agricultura, 11 % incinerado, 40 % disposto em aterro e 12 % disposto em áreas como floresta e silvicultura (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

A reciclagem agrícola tem sido amplamente empregada nos países desenvolvidos e considerada a alternativa de disposição do lodo com menor impacto ambiental negativo (ANDREOLI et al., 1997). Segundo os autores ANDREOLI et al. (1997) e WANG et al. (2008) os principais impactos negativos da utilização agrícola do lodo são: contaminação por patógenos, contaminação por metais pesados, atração de

insetos, emissão de odores e impactos estéticos e sociais sobre a população.

Os principais patógenos encontrados no lodo são: ovos de helmintos, cistos de protozoários, bactérias e vírus. A concentração destes patógenos depende da origem, época de coleta da amostra e do processo de tratamento do lodo. Os processos comumente empregados para o tratamento são: digestão, compostagem e calagem (BARROS et al., 2011).

A calagem consiste na adição de cal ao resíduo, elevando o pH a níveis superiores a 12,0, o que inativa e destrói parte dos patógenos. É tida como uma alternativa simples à estabilização e desinfecção do lodo, bem como a redução de odor (ANDREOLI et al., 1997).

Raramente os sistemas de tratamento de esgoto transportam somente o esgoto doméstico; efluentes industriais são frequentemente incorporados. Assim, o lodo pode conter substâncias tóxicas como detergentes, pesticidas e metais pesados que podem ser prejudiciais quando entram na cadeia trófica (SINGH e AGRAWAL, 2008; MELFI e MONTES, 2001; WANG et al., 2008).

Dependendo dos processos físico-químicos envolvidos no tratamento de esgoto, o lodo tende a acumular metais pesados. Metais como Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Hg e Cr são os principais elementos que restringem a aplicação do lodo na agricultura (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008). A disponibilidade desses metais é altamente influenciada pelo pH do solo, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica, concentração original do metal, textura, tipo de argila e especiação de cada metal (NASCIMENTO et al., 2004).

Contudo, impactos positivos também são gerados pela disposição final do lodo no solo, tais como: reciclagem de resíduos, estabilização dos agregados do solo, aumento da capacidade de retenção de água no solo, aumento do teor de matéria orgânica o que favorece a flora e a fauna edáfica e aumento da produtividade agrícola pela disponibilidade de NPK e Ca+Mg (ANDREOLI et al., 1997).

O lodo apresenta em sua constituição material orgânico, macronutrientes, micronutrientes, poluentes orgânicos e inorgânicos e microrganismos. Macro e micronutrientes servem como fonte de nutrientes para as plantas e os constituintes orgânicos funcionam como condicionador para o solo. A matéria orgânica adicionada através do lodo pode melhorar as propriedades físicas do solo como porosidade, estabilidade dos agregados e capacidade de retenção de água (SINGH e AGRAWAL, 2008).

Além disso, a aplicação agrícola do lodo melhora a atividade microbológica, bem como a respiração e a atividade das enzimas do solo. O aumento da atividade da enzima é atribuído a melhora da atividade microbológica, que por sua vez é estimulada pelo alto teor de nutrientes e de matéria orgânica. No entanto, quando o lodo apresenta alta concentração de metais pesados, a atividade das enzimas do solo pode ser inibida (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

Quando o destino dos lodos é a agricultura, o conhecimento de sua composição química e biológica é muito importante, uma vez que os materiais gerados nas ETEs são bastante diversificados, dada a qualidade do esgoto bruto, do tipo de tratamento de esgoto utilizado, e do tipo de tratamento e condicionamento do lodo gerado (COMPARINI, 2001). Adicionalmente, a composição química do lodo é uma

importante chave na determinação da taxa de aplicação e na prevenção à contaminação das águas subterrâneas.

O uso agrícola do lodo além de fornecer os nutrientes essenciais para o crescimento da planta reduz consideravelmente os problemas ambientais e econômicos que limitam sua disposição em aterro e incineração. No entanto, devem ser tomados cuidados na escolha do solo, do lodo e da cultura a ser utilizada.

Conforme SANEPAR (1997) as culturas mais recomendadas e com melhor resposta ao uso do lodo são as gramíneas, como milho, trigo, cana e sorgo. Entretanto, outras aplicações como fruticultura, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas também podem ser realizadas, desde que atendidos os critérios legais estabelecidos para sua utilização. No entanto, é vetado o uso do lodo (mesmo higienizado) para a horticultura e demais produtos consumidos crus que tenham contato direto com o resíduo.

Nesse sentido, buscando regularizar tal aplicação o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução 375/2006 (BRASIL, 2006), que “define os critérios e procedimentos, para o uso em áreas agrícolas do lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados”. Esta Resolução além de visar os benefícios advindos do lodo à agricultura, procura evitar os riscos associados a sua aplicação em relação à saúde pública e ao meio ambiente.

De acordo com essa norma legal, os lodos só poderão ser utilizados na agricultura após passarem por um processo de redução de patógenos e de atratividade de vetores. Além disso, é vetada a utilização do resíduo em culturas como pastagens, olerícolas, tubérculos, raízes, culturas inundadas e qualquer cultura que tenha sua parte comestível em contato com o lodo.

Outro ponto importante a ser destacado dessa Resolução é a classificação do lodo conforme a concentração de patógenos: classe A ou classe B. Adicionalmente, a partir de 2011 será permitida somente a aplicação de lodo classe A e por isso há necessidade de novos estudos demonstrando a segurança do uso de lodo classe B em solos.

Existe uma grande expectativa por parte das empresas de saneamento público que a Resolução 375/2006 seja revisada nos próximos anos, uma vez que a atual é considerada por demais restritiva. Dessa forma, trabalhos de pesquisa envolvendo lodos servirão como importantes bases para o estabelecimento de critérios mais reais em decisões que poderão ser tomadas futuramente.

Neste contexto, este estudo procurou avaliar a disponibilidade dos metais presentes nos lodos às amostras de solo, por meio de ensaio de adsorção, e avaliar em casa de vegetação o efeito da aplicação de diferentes tipos de lodos na qualidade do solo e no desenvolvimento vegetal de plantas de milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta e preparação da amostra

2.1.1 Solo

Duas amostras de solo foram utilizadas nos ensaios, sendo que em uma amostra foi adicionado areia inerte para torná-la com textura distinta. Portanto, o solo denominado argiloso refere-se à amostra de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura muito argilosa, coletado na profundidade de 0-20 cm em Viçosa-MG. Por sua vez, o solo denominado arenoso foi obtido pela mistura de 70% da amostra coletada na profundidade de 0-20 cm do mesmo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura muito argilosa com 30 % de areia comercial, apresentando a mistura textura argilo-arenosa. Essas amostras foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha. Posteriormente, foram retiradas alíquotas representativas dessas amostras para os ensaios e para as análises de caracterização física, química e mineralógica.

2.1.2 Lodos de esgoto

O Quadro 1 apresenta as principais características das Estações de Tratamento de Esgoto em que foram obtidas as amostras de lodo. A coleta destes materiais foi realizada em agosto de 2010.

Com o intuito de reduzir o odor proveniente da digestão dos lodos, a COPASA adota como medida mitigadora a adição, sem controle, de cal virgem. Portanto, os lodos em estudo não podem ser considerados biossólidos, pois não receberam tratamento controlado, apenas adição de cal como descrito acima.

Para a obtenção de alíquotas representativas a serem utilizadas no ensaio em casa de vegetação e nas análises de caracterização física e química, as amostras de lodo foram secas ao ar, moídas e homogeneizadas.

2.2 Caracterização das amostras

2.2.1 Solo

As análises químicas e físicas de forma geral seguiram as recomendações de EMBRAPA (1997) e RUIZ (2005). Na terra fina seca ao ar, TFSA, foram determinados argila dispersa em água (ADA), granulometria, equivalente de umidade (EU), P, K, N, Na, Ca, Mg, acidez potencial (H+Al), pH em água e carbono orgânico (CO) (YEOMANS e BREMNER, 1988). Com os resultados obtidos nas análises do complexo sortivo foram calculadas a soma de base trocáveis (SB), a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC) e a saturação por base (V).

As análises mineralógicas realizadas foram: Fe ditionito (Fed), Fe oxalato (Feo) e difração de raios-X. A difração de raios-X foi conduzida em difratômetro multifuncional X'Pert Pro PW 3040/60, tubo de raios-x cerâmico, foco fino longo, equipado com anodo de cobalto, 1800W, 60kV (radiação Co-K α , $\gamma = 1,79026 \text{ \AA}$),

operado com uma diferença de potencial de 40 kV e uma corrente elétrica de 30 mA, detector de estado sólido X'celerator. As amostras em pó foram acondicionadas em porta-amostras de modo a provocar o mínimo de orientação possível e as varreduras foram realizadas no modo passo a passo em intervalo de 4 a 50° 2 θ com 0,05° de incremento e 2 segundos de contagem de tempo em cada passo.

Quadro 1. Principais características das Estações de Tratamento de Esgoto em estudo

ETE	Município atendido	Habitantes atendidos	Tratamento de esgoto utilizado	Disposição final do lodo	Local de coleta da amostra
Vespasiano	Vespasiano	33.600	Lodos ativados - Aeração prolongada modificada	Aterro Sanitário Belo Horizonte	Decantador – descarte do lodos ativados
Morro Alto	Vespasiano	10.000	Lodos ativados – Aeração prolongada	Aterro Sanitário Belo Horizonte	Decantador – descarte do lodos ativados
Nova Pampulha	Vespasiano	-	UASB + Filtro biológico + decantador secundário	Aterro Sanitário Belo Horizonte	Leitos de secagem – descarte do UASB
Vila Maria	Lagoa Santa	15.934	UASB + Flotação	Aterro Sanitário Belo Horizonte	Leitos de secagem – descarte da flotação

Fonte: www.copasa.com.br

Os teores de ferro extraíveis com ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) e com oxalato ácido de amônio a pH 3,0 (Feo) foram determinados na fração argila, adotando-se para tal os procedimentos analíticos descritos por MEHRA e JACKSON (1960) e McKEAGUE e DAY (1966), sendo o Fe dosado por espectrometria de absorção atômica.

Os resultados obtidos para a caracterização física, química e mineralógica dos dois tipos de solos estão demonstrados no Quadro 2. Os difratogramas das frações areia, silte e argila estão representados respectivamente nas Figuras 1, 2 e 3.

Adicionalmente, foram avaliadas as formas disponíveis dos metais Zn, Cd, Cr, Ni e Pb via DTPA (ABREU et al., 2001) para os solos utilizados.

Quadro 2. Caracterização física, química e mineralógica das amostras de solo

Solo	Textura			ADA	EU	pH	P	Na	K
	Areia	silte	Argila						
	—	dag kg ⁻¹	—	—	kg kg ⁻¹	H ₂ O	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	
Argiloso	29	1	70	0,20	0,291	4,20	3,4	0,00	0,08
Arenoso	53	7	40	0,15	0,178	4,22	2,8	0,00	0,05
Solo	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	SB	CTC	V	MO	Fed	Feo
	cmol _c dm ⁻³					%	dag kg ⁻¹	g kg ⁻¹	
Argiloso	0,08	0,09	14,2	0,25	14,45	1,7	5,87	56,8	3,4
Arenoso	0,03	0,06	11,0	0,14	11,14	1,3	4,24	50,9	1,8

ADA - Argila dispersa em água - agitação lenta

EU - Equivalente de umidade

pH em água - Relação 1:2,5

K, Na, P - Extrator HCl 0,5 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich 1) - Relação 1:10

Ca, Mg - Extrator KCl 1 mol L⁻¹ - Relação 1:10

H+Al - Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0 - Relação 1:10

SB - Soma de bases trocáveis

CTC - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0

V - Índice de saturação por bases

MO - Matéria orgânica (MO = 1,724 x CO)

CO - Carbono orgânico - Extrator K₂Cr₂O₇+H₂SO₄+FeSO₄ · 7H₂O

Fed - Extrator ditionito-citrato-bicarbonato de sódio 0,3 mol L⁻¹

Feo - Extrator oxalato ácido de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3,0

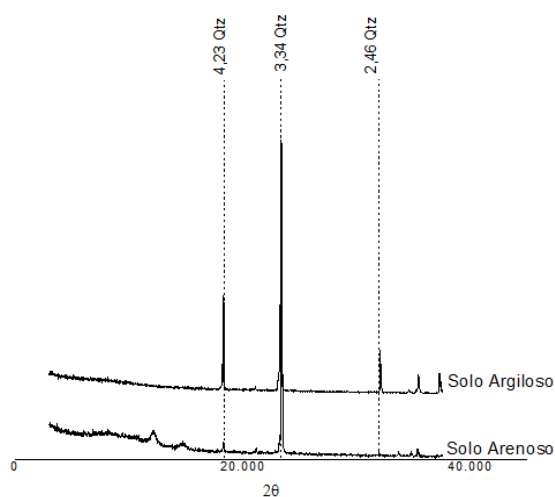


Figura 1. Difratograma da fração areia.

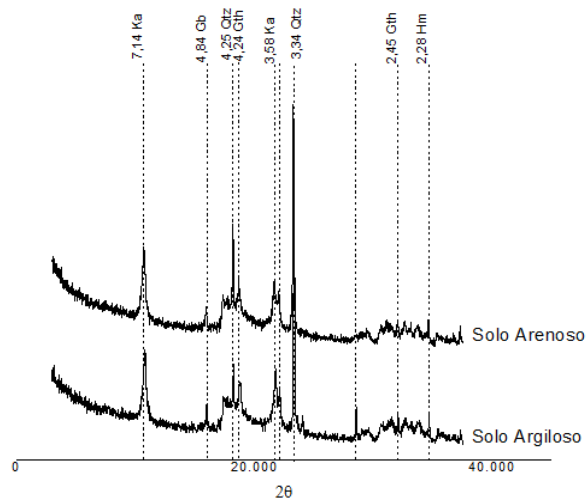


Figura 2. Difratoograma da fração silte.

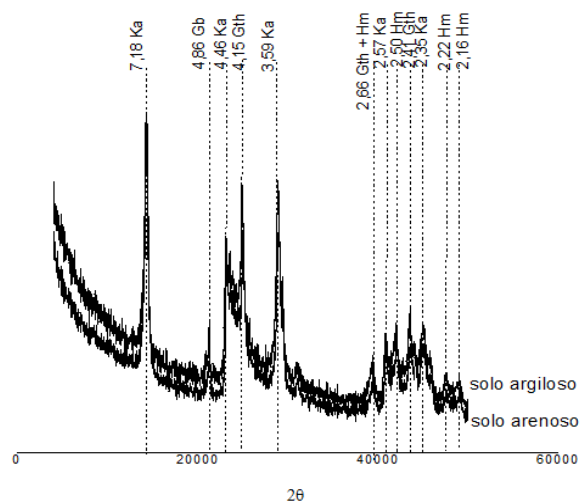


Figura 3. Difratoograma da fração argila natural.

2.2.2 Lodos de esgoto

Nas amostras dos lodos foram realizadas análises de pH, umidade (KIEHL, 1985), digestão sulfúrica para determinação de N; digestão nitroperclórica para determinação dos elementos P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, Mn, Pb, Cr, Ni e Cd (SCOTT, 1978) e combustão em mufla para determinação do conteúdo de matéria orgânica (KIEHL, 1985).

Na avaliação das formas disponíveis dos metais Zn, Cd, Cr, Ni e Pb via DTPA foi executada a metodologia proposta por ABREU et al., (2001).

2.3 Adsorção

Foi realizado um estudo de adsorção individual e competitiva dos metais (Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn) com objetivo de prever o comportamento destes elementos nas amostras de solos utilizadas no experimento em casa de vegetação.

O Cu não foi considerado nos ensaios de adsorção bem como na avaliação dos efeitos da adição de lodos aos solos por apresentar alta capacidade de complexação com a matéria orgânica e alta afinidade com a superfície adsorvente dos óxidos de Fe e Mn (MALAVOLTA, 1980; NASCIMENTO et al., 2003). Além disso, o Cu é pouco móvel nas plantas, permanecendo imobilizado principalmente nas raízes e nos tecidos foliares até sua senescência (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001).

No experimento de adsorção individual dos metais, foram utilizadas soluções contendo dez concentrações crescentes (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 e 4,0 mmol L⁻¹), preparadas em NaNO₃ 2 mmol L⁻¹ e ajustadas a pH 5,5 ± 0,2.

Para o ensaio de adsorção competitiva foram utilizadas soluções contendo cinco concentrações crescentes de cada metal, conforme Quadro 3. Esses valores foram obtidos pela proporção aproximada entre os metais, calculada a partir da média aritmética dos totais de cada metal encontrados para cada lodo. A proporção utilizada foi de 1:20:40:170:730:1020 (Cd:Pb:Ni:Cr:Mn:Zn). Da mesma forma, as soluções foram preparadas em NaNO₃ 2 mmol L⁻¹, porém ajustadas a pH 4,0 ± 0,2. O ajuste foi realizado a pH 4,0 ± 0,2, pois verificou-se que acima deste valor ocorria precipitação na solução.

Em todos os ensaios de adsorção, as soluções foram colocadas para agitar com as amostras de solo, na proporção 1:20 (solo:solução). Em tubos de centrífuga, com capacidade para 50 mL foram adicionados 20 mL de cada solução e 1,0 g de solo, corrigido pela umidade residual. Os tubos foram tampados e, em seguida, agitados em um agitador orbital de 150 oscilações por minuto durante 24 horas à temperatura ambiente. Terminada a agitação, as suspensões foram centrifugadas a 3.000 rpm por 5 minutos para a separação do sobrenadante, o qual após filtração em papel de filtro rápido, foi recolhido em frascos plásticos e acondicionados em geladeira até a dosagem dos elementos por espectrofotometria de absorção atômica (EAA). O experimento foi conduzido em triplicata.

Assumiu-se que a concentração dos metais adsorvidos pelas partículas do solo seria a diferença entre a concentração inicial do metal em solução e a quantidade remanescente no fim do período de reação. Os valores abaixo do limite de detecção foram considerados zero para efeito de cálculo.

Após os cálculos foram ajustadas a isoterma de Langmuir. Para o ensaio competitivo a isoterma de Langmuir foi construída utilizando o somatório da concentração de equilíbrio e o somatório dos cátions metálicos adsorvidos para cada concentração aplicada.

A isoterma de Langmuir, na forma hiperbólica, é dada por:

$$q = (a \cdot b \cdot C_e) / [1 + (a \cdot C_e)] \quad \text{Eq. 1}$$

em que,

- C_e → concentração do íon na solução de equilíbrio, dada em (mmol L^{-1});
 q → quantidade do elemento adsorvido (mmol kg^{-1});
 b → adsorção máxima do elemento (mmol kg^{-1});
 a → coeficiente relacionado à energia de ligação (L mmol^{-1}).

Com base na equação 1 foi possível prever a capacidade máxima de adsorção dos metais pelas amostras de solos e o coeficiente relacionado à energia de ligação.

Quadro 3. Concentrações crescentes dos metais utilizados no ensaio de adsorção competitiva

Cd	Pb	Ni	Cr	Mn	Zn
0,00	0,02	0,04	0,15	0,68	0,92
0,00	0,04	0,07	0,31	1,31	1,84
0,01	0,14	0,29	1,22	5,26	7,34
0,01	0,18	0,36	1,53	6,57	9,18
0,01	0,22	0,43	1,84	7,88	11,02
0,01	0,29	0,58	2,45	10,51	14,69
0,02	0,32	0,65	2,75	11,83	16,52

2.4 Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

As amostras de solos após secas e peneiradas, foram dispostas em vasos de 3 dm^3 e enriquecidas com diferentes tipos e doses de lodos. As doses utilizadas foram equivalentes a 0, 10, 25, 50, 75 e 100 t ha^{-1} , em base seca.

A aplicação do lodo foi superficial e os vasos foram incubados por vinte dias, mantendo-se umidade próxima à capacidade de campo dos solos. A capacidade de campo foi estimada a partir do resultado de equivalente de umidade (RUIZ et al., 2003).

Terminada a incubação, foram semeadas três sementes de milho (DKB 370 híbrido) em cada vaso. Ao vigésimo dia foi realizado o desbaste, mantendo duas plantas até o quadragésimo quinto dia. Após o cultivo iniciou-se as análises no solo e na planta.

2.4.1 Solo

No solo foram realizadas análises físicas e químicas de rotina (K, Ca, Mg, P, Na, MO, pH, argila dispersa em água, N-total, P-rem, H+Al, CTC à pH 7,0) (EMBRAPA, 1997) e determinados os teores disponíveis dos seguintes elementos: Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn (ABREU et al., 2001).

2.4.2 Planta

As plantas foram previamente lavadas com água deionizada, separadas em caule e folhas, e secas em estufas de recirculação forçada durante 72 horas a uma temperatura

entre 68 e 72 °C. Em seguida, as amostras foram pesadas em balança de precisão para a determinação da matéria seca.

Posteriormente, as folhas foram moídas em moinho de faca de aço inox e acondicionadas em sacos de papel até a determinação do acúmulo de elementos tóxicos por meio da digestão nitroperclórica (TEDESCO et al., 1995).

2.4.3 Análise Estatística

A disposição dos vasos foi em blocos casualizados com os tratamentos dispostos em esquema fatorial 2[(4x6)-3], correspondendo respectivamente a dois tipos de solos, quatro tipos de lodos e seis doses, com três repetições,. A dose 0 t ha⁻¹ foi testada apenas uma vez em cada tipo de solo.

A avaliação dos efeitos do uso de lodo sobre a produção de matéria seca e sobre os teores de metais pesados no solo e nas folhas de milho em função das diferentes dosagens aplicadas foi obtida por meio da análise de variância e pelo desdobramento da interação solo x lodo x dose, no sentido de se avaliar os efeitos (linear, quadrático e cúbico) de dose de cada lodo para cada solo. Selecionou-se o modelo de regressão polinomial que apresentou melhor ajuste aos dados e obtiveram-se as equações de regressão.

Para a avaliação dos efeitos das doses de lodo sobre as características físicas e químicas dos solos (macro e micronutrientes) foi realizada análise de variância e as médias foram comparadas segundo o teste de Tukey, à 5 % de probabilidade.

Nas análises estatísticas foram utilizados os softwares Statistica e SAEG.

2.5 Reagentes e Soluções

Todas as soluções foram preparadas com água deionizada e reagentes químicos de grau analítico. As soluções-padrão para as curvas de calibração foram preparadas por meio de diluições sucessivas de soluções estoque (1000 mg L⁻¹).

As soluções empregadas no ensaio de adsorção foram preparadas utilizando nitrato dos metais, exceto para o Pb em que foi utilizado cloreto.

Os experimentos foram realizados em triplicata incluindo um branco de reagentes para a avaliação de possíveis contaminações que pudessem prejudicar os resultados. Na digestão nitroperclórica e na determinação dos metais por DTPA foram utilizadas amostras-controle, a fim de certificar os resultados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do solo

As características químicas das amostras de solo permitiram defini-lo como um solo fortemente ácido, bem drenado e com baixa saturação por bases. Os resultados obtidos nas análises de Fed e Feo confirmaram a predominância de óxidos de Fe bem cristalizados em comparação aos mal cristalizados.

Adicionalmente, verificou-se por meio dos difratogramas de raios X a predominância dos minerais característicos de solos em estágio de intemperismo avançado: caulinita, goethita, hematita e gibbsita na fração argila.

3.2 Caracterização dos lodos de esgoto

Com base nos resultados obtidos (Quadro 4), em geral os lodos apresentaram baixos teores de umidade, uma vez que foram previamente secos, em leitos de secagem nas ETEs.

No que se refere aos atributos químicos dos lodos verificou-se que apenas o resíduo Vila Maria apresentou pH em torno de 4,0. Observou-se ainda que os lodos apresentaram elevados valores de CO, N-total, Ca, Mg, P, Mn, Zn e Cu, podendo desta forma servir como fonte alternativa de macro e micronutrientes para os solos.

Contudo, a assertiva confirmada por vários autores (SAMARAS et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2004; ROSS et al., 1990; MELO et al., 1997) foi também encontrada neste trabalho. Os lodos apresentaram em sua constituição baixa concentração de K, sendo necessária à realização de uma fertilização adicional deste elemento.

É válido ressaltar que estes lodos foram adquiridos em ETEs localizadas na região metropolitana de Belo Horizonte e que provavelmente receberam contribuição de efluentes industriais. Assim, por meio da digestão nitroperclórica foi possível avaliar a presença dos metais pesados Cr, Pb, Cd e Ni nesses resíduos. No geral, as concentrações em mg kg^{-1} destes metais seguiram a sequência: $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$.

Além disso, conforme dados demonstrados no Quadro 4 observa-se que os lodos se adequam à utilização agrícola no que diz respeito aos atributos químicos, uma vez que os teores de metais pesados foram menores que os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2006.

Com base nos resultados de extração por DTPA (Quadro 5) em relação aos teores totais obtidos pela digestão nitroperclórica dos metais Cd, Pb, Ni, Cr e Zn, verificou-se que, em geral, os metais Pb e Cr apresentaram menores taxas de recuperação que os metais Cd, Ni e Zn, indicando que o Pb e o Cr encontram-se nos resíduos em formas de menor disponibilidade às plantas e ao solo.

Não houve resultados para a extração pelo método DTPA dos metais Cd e Pb no lodo Vila Maria pois os dados referentes à extração total já se encontravam abaixo do limite de detecção do EAA.

Quadro 4. Caracterização física e química das amostras de lodo

Lodos	Umidade kg kg ⁻¹	pH H ₂ O	CO — dag kg ⁻¹ —	N-total —	P —	K g kg ⁻¹	Ca —	Mg —
Vespasiano	0,107	6,86	29,83	1,79	13,31	2,19	33,28	2,34
Morro Alto	0,068	6,60	18,83	1,23	7,14	2,29	8,39	1,79
Nova Pampulha	0,081	5,79	29,42	1,63	6,69	2,49	20,11	2,60
Vila Maria	0,108	4,28	22,41	1,30	22,24	0,80	17,42	0,88
Lodos	Na g kg ⁻¹	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
					mg kg ⁻¹			
Vespasiano	2,81	0,9	67,7	140,7	17,8	47,7	654,0	329,7
Morro Alto	1,60	0,4	63,1	44,1	16,0	32,9	242,0	274,8
Nova Pampulha	1,10	0,4	40,6	188,9	18,6	24,9	562,0	325,7
Vila Maria	0,70	< ld	62,1	72,6	4,4	< ld	349,0	240,8
Limite ¹	-	39	1000	1500	420	300	2800	-

(1) Concentração máxima permitida de metais pesados no lodo de esgoto para uso na agricultura conforme Resolução 375 CONAMA (2006).

< ld = abaixo do limite de detecção do EAA.

pH em água – Relação 1:2,5

K, Na, P – Extrator HCl 0,5 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich 1) – Relação 1:10

Ca, Mg – Extrator KCl 1mol L⁻¹ – Relação 1:10

CO – Carbono orgânico – Extrator K₂Cr₂O₇+H₂SO₄+FeSO₄ 7H₂O

N-total – Nitrogênio total

Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Mn – digestão nitroperclórica

Quadro 5. Teores dos metais, presentes nas amostras de solo e de lodo, extraídos por DTPA em pH 7,3

	Cd	Pb	Ni	Cr	Mn	Zn
			mg kg ⁻¹			
Solo Argiloso	0,00	0,00	0,04	0,03	0,64	0,43
Solo Arenoso	0,01	0,00	0,04	0,03	0,68	0,41
Lodo	0,24	4,21	3,89	0,63	22,53	119,73
Vespasiano	(26,7 %)	(8,8 %)	(21,8 %)	(0,9 %)	(6,8 %)	(18,3 %)
Lodo	0,07	1,27	2,18	0,90	21,73	27,20
Morro Alto	(17,5 %)	(3,9 %)	(13,6 %)	(1,4 %)	(7,9 %)	(11,2 %)
Lodo	0,05	0,30	2,87	0,21	2,13	40,27
Nova Pampulha	(12,5 %)	(1,2 %)	(15,4 %)	(0,5 %)	(0,6 %)	(7,2 %)
Lodo	0,00	0,00	0,99	0,04	19,00	6,00
Vila Maria	-	-	(22,5 %)	(0,1 %)	(7,9 %)	(1,7 %)

Os valores em parênteses se referem à porcentagem dos teores dos metais extraídos por DTPA pH 7,3 em relação aos teores totais extraídos por digestão nitroperclórica.

3.3 Adsorção individual de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn

No Quadro 6 e nas Figuras 4 a 9 são apresentados os parâmetros e as isotermas de adsorção de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn, respectivamente.

Os ensaios de adsorção individual buscaram prever a capacidade dos solos em adsorver os metais estudados e conseqüentemente à facilidade com que esses metais serão absorvidos pelas plantas ou lixiviados ao longo do perfil.

A adsorção é considerada o mais importante mecanismo regulador da concentração de metais pesados nos solos e está relacionada principalmente com as seguintes propriedades: pH, CTC, matéria orgânica, argila silicatada, óxidos de Fe, Al e Mn (McBRIDE, 1994).

Como as amostras de solo utilizadas nos ensaios de adsorção apresentaram mineralogia semelhante, provavelmente as diferenças de adsorção dos metais pelos solos estiveram relacionadas com a CTC, com a matéria orgânica e com a textura.

Analisando separadamente os resultados encontrados para o coeficiente relacionado à energia de ligação dos cátions metálicos pelo complexo sortivo tem-se a seguinte ordem (Quadro 6):

Solo Argiloso: Ni > Cr > Cd > Mn > Pb > Zn

Solo Arenoso: Ni > Cd > Cr > Mn > Zn > Pb

Portanto, os metais Ni, Cd e Cr demonstraram maior afinidade aos sítios de adsorção que os metais Pb, Mn e Zn.

Em geral, a constante relacionada com a energia de ligação entre os metais e o solo foi maior quando se utilizou o solo argiloso, exceto para os metais Cd e Zn que apresentaram maiores valores no solo arenoso.

Esta maior afinidade dos metais pelo solo argiloso se deve provavelmente a maiores valores de CTC pH 7,0 obtidos para essas amostras. Desta forma, o solo argiloso apresentou maior teor de matéria orgânica, refletindo em uma maior CTC do solo e conseqüentemente a maior afinidade dos cátions metálicos pelo complexo sortivo e a maiores valores de capacidade máxima de adsorção para os metais.

Em relação à capacidade máxima de adsorção dos metais pelas amostras de solo observou-se que os metais Cr e Pb apresentaram maiores valores que os metais Cd e Ni. A maior capacidade de adsorção do Cr pelo complexo sortivo se deve a sua forma trivalente, enquanto os demais metais estão na forma divalente.

Além disso, segundo McBRIDE (1994) o comportamento diferenciado da adsorção de Cd em relação à adsorção de Pb se deve ao fato da retenção de Cd ocorrer na sua maior parte por meio de forças eletrostáticas, o que a torna altamente dependente da CTC dos solos. Por sua vez, as interações do Pb com os colóides dos solos são mais específicas e menos dependentes das cargas superficiais (PIERANGELI et al., 2001).

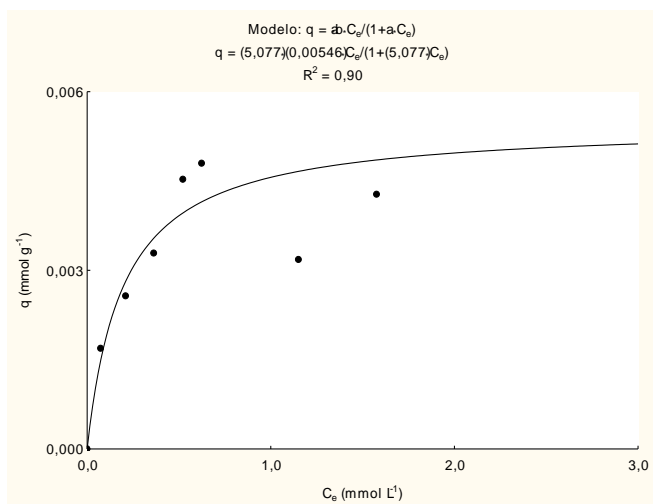
Quadro 6. Parâmetros obtidos pela Isotherma de Langmuir no ensaio de adsorção individual dos metais

Parâmetros	Cd	Pb	Ni	Cr	Mn	Zn
Solo Argiloso						
b (mmol kg ⁻¹)	5,46	23,97	2,50	34,83	3,81	10,43
a (L mmol ⁻¹)	5,08	1,36	66,12	7,93	2,70	1,04
R^2	0,90	0,95	0,87	0,95	0,86	0,94
Solo Arenoso						
b (mmol kg ⁻¹)	2,90	18,65	2,39	30,54	3,97	6,17
a (L mmol ⁻¹)	13,09	1,20	44,09	4,93	2,01	1,69
R^2	0,88	0,93	0,86	0,94	0,94	0,86

b = capacidade máxima de adsorção dos metais;
 a = constante relacionada à energia de ligação;

R^2 = coeficiente de correlação.

(a)



(b)

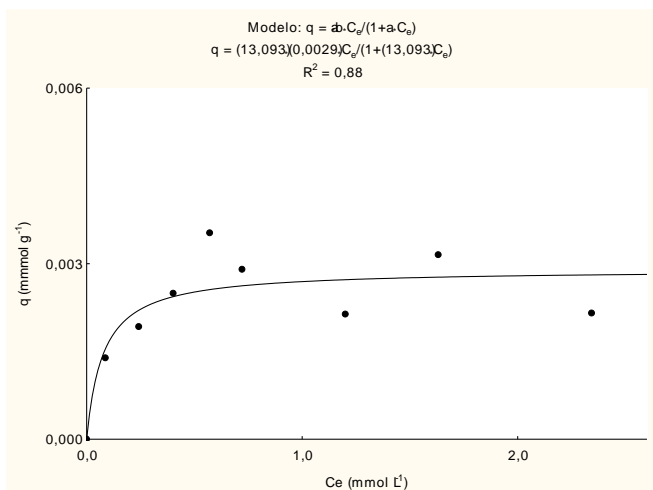
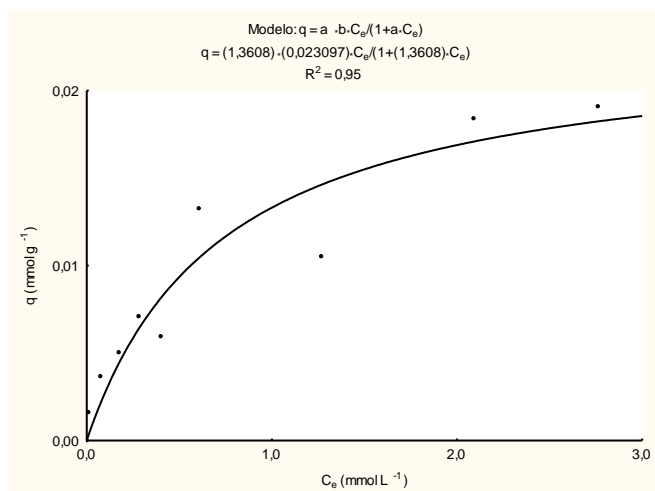


Figura 4. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de cádmio em pH 5,5±0,2 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

(a)



(b)

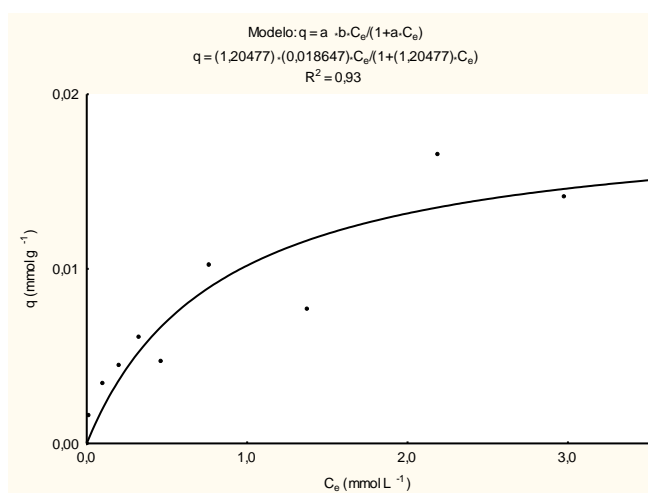
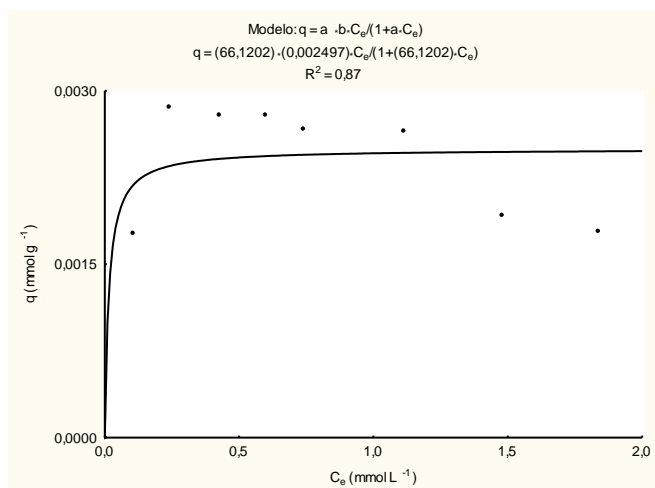


Figura 5. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de chumbo em pH 5,5±0,2 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

(a)



(b)

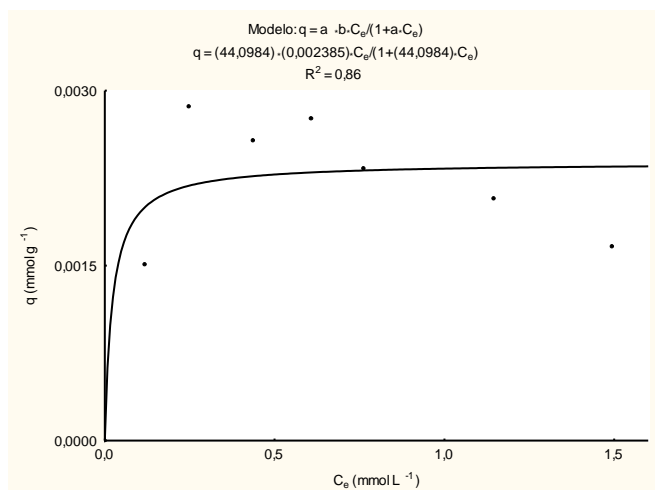
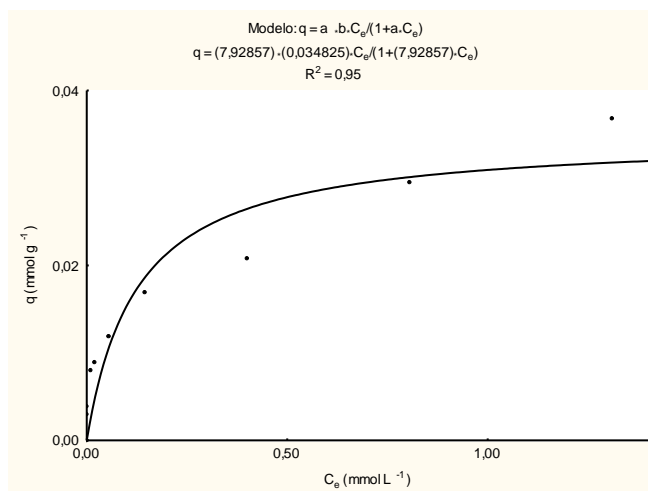


Figura 6. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de níquel em pH 5,5±0,2 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

(a)



(b)

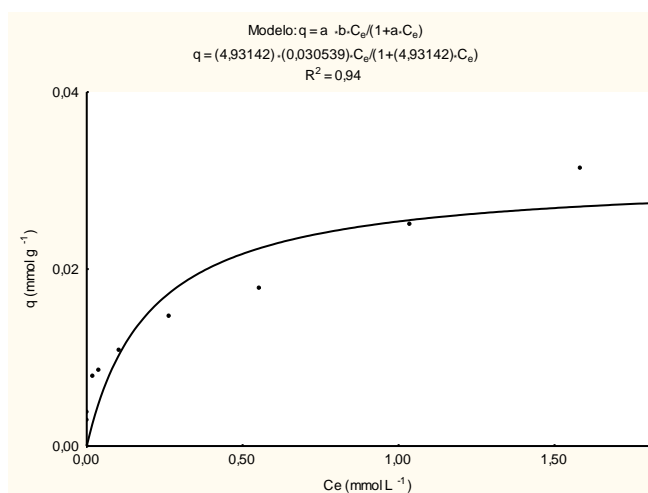
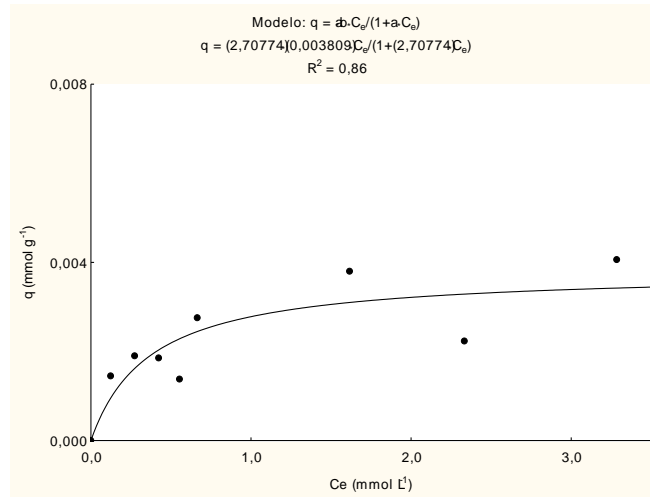


Figura 7. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de cromo em pH 5,5±0,2 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

(a)



(b)

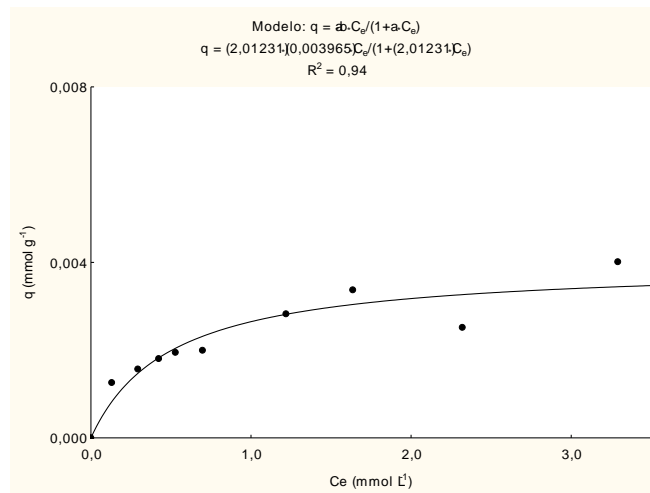
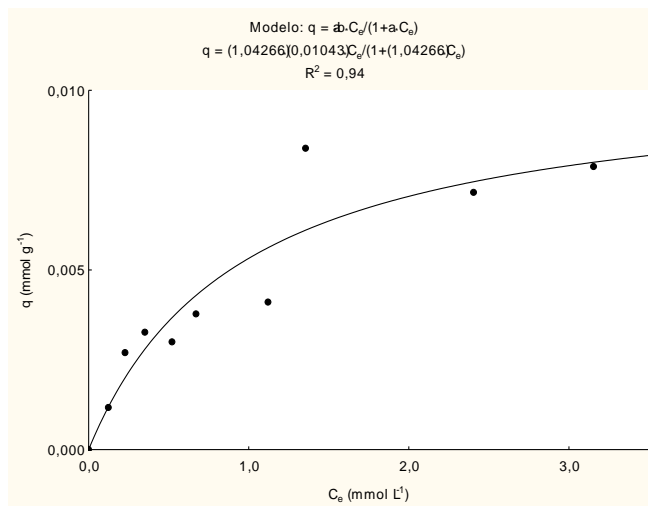


Figura 8. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de manganês em pH $5,5 \pm 0,2$ (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

(a)



(b)

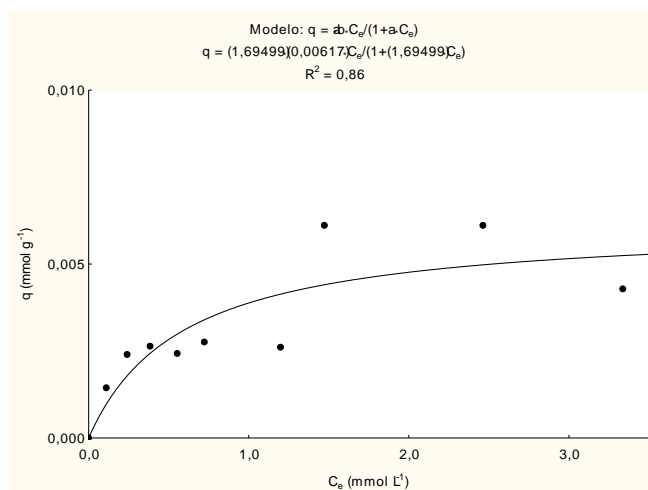


Figura 9. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de zinco em pH 5,5±0,2 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

3.4 Adsorção competitiva de Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn

Considerando que a aplicação de lodo pode gerar soluções multielementares nos solos e que a competição entre os metais pesados afetam a sua mobilidade e retenção, se fez necessário à realização de um ensaio de adsorção competitiva entre os metais Cd, Pb, Ni, Cr, Mn e Zn.

A adsorção competitiva de metais tem sido tema de muitos estudos (FONTES e GOMES, 2003; GOMES et al., 2001; MATOS, 1996). Em geral os resultados demonstram que o Cr e o Pb são mais fortemente adsorvidos que o Cd, Zn e Ni. Contudo, os trabalhos relacionados utilizaram concentrações iguais para cada um dos metais. Diferentemente, o ensaio de adsorção competitiva realizado neste trabalho fez uso de soluções dos cátions metálicos Cd^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} e Zn^{2+} na mesma proporção em que estes se encontravam nos lodos (Quadro 4).

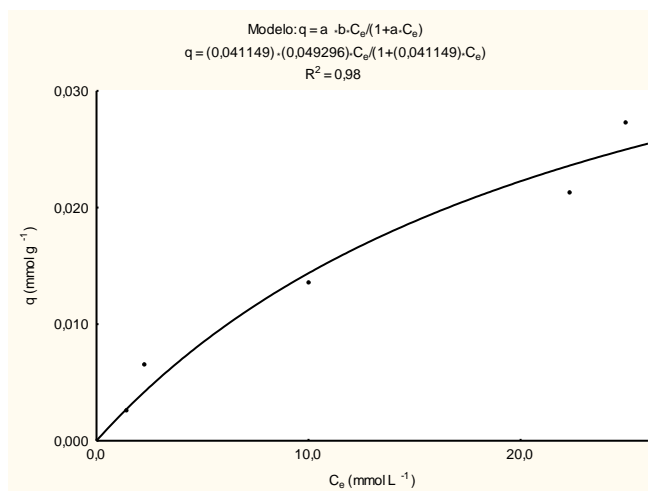
As capacidades máximas de adsorção dos metais foram estimadas pela equação da isoterma de Langmuir. Os resultados obtidos (Figura 10) sugerem que o solo argiloso retém os metais em maior quantidade ($49,27 \text{ mmol kg}^{-1}$) que o solo arenoso ($36,81 \text{ mmol kg}^{-1}$).

O Quadro 7 mostra a concentração de equilíbrio (C_e) e a quantidade adsorvida dos cátions metálicos após o experimento de adsorção. Para a adsorção competitiva as amostras do solo, em geral, apresentaram comportamentos similares. Nas menores concentrações de metais aplicadas, a quantidade de todos os metais em solução foi baixa, mostrando que a maior parte dos metais foram adsorvidos pelas amostras de solo. Com o aumento das concentrações aplicadas, apenas o Cr manteve alta adsorção. Esperava-se que o Pb fosse altamente adsorvido, contudo por efeito de massa o Mn e o Zn acabaram competindo mais fortemente com o Pb pelos sítios de adsorção.

Os dados demonstrados no Quadro 8 dizem respeito a porcentagem de cada metal retido no complexo de adsorção. Observa-se que para as duas amostras de solo, a quantidade dos metais adsorvidos pelo complexo sortivo seguiu a mesma sequência: $\text{Cr} > \text{Zn} \sim \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$. Além disso, a competição entre os metais Cd, Pb, Ni, Mn e Zn fez com a adsorção do Cr aumentasse ainda mais à medida em que foram aplicadas soluções mais concentradas.

O Cd e o Ni, embora tenham apresentado altos valores para o coeficiente relacionado à energia de ligação (Quadro 6), indicando alta afinidade pelo complexo sortivo, foram pouco adsorvidos no ensaio competitivo quando comparado aos outros metais, uma vez que foram utilizadas baixas concentrações iniciais. Ao passo que o Mn e o Zn mesmo em concentrações iniciais maiores, foram pouco adsorvidos, pois apresentaram baixa afinidade pelos sítios de adsorção.

(a)



(b)

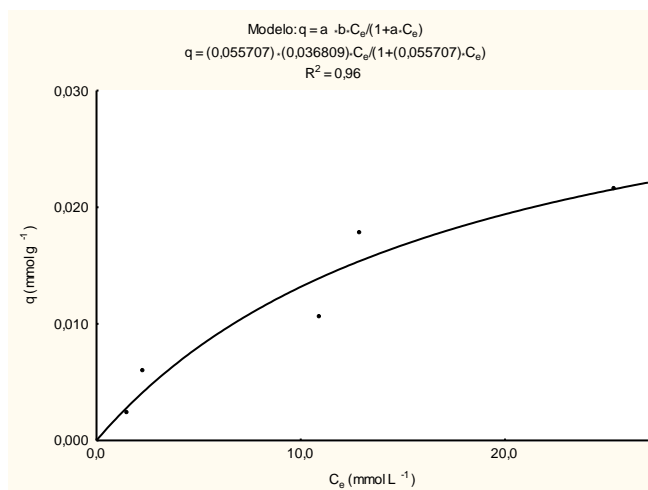


Figura 10. Estimativa da isoterma de Langmuir para a solução competitiva em pH 4,0 (a) solo argiloso, (b) solo arenoso.

Quadro 7. Concentração de equilíbrio (C_e) em mmol L^{-1} , cátion adsorvido (q) em mmol kg^{-1}

Solo	Cátions metálicos											
	Cd^{2+}		Ni^{2+}		Pb^{2+}		Cr^{3+}		Mn^{2+}		Zn^{2+}	
	C_e (mmol L^{-1})	q (mmol kg^{-1})	C_e (mmol L^{-1})	Q (mmol kg^{-1})	C_e (mmol L^{-1})	q (mmol kg^{-1})	C_e (mmol L^{-1})	q (mmol kg^{-1})	C_e (mmol L^{-1})	q (mmol kg^{-1})	C_e (mmol L^{-1})	q (mmol kg^{-1})
Argiloso	0,00	< ld	0,03	0,10	0,00	0,30	0,01	1,70	0,55	0,10	0,80	0,30
	0,00	< ld	0,07	0,10	0,01	0,50	0,01	4,40	0,89	0,80	1,24	0,70
	0,01	< ld	0,25	0,60	0,08	1,20	0,27	9,00	4,04	2,10	5,37	0,70
	0,01	0,10	0,54	0,40	0,21	1,50	0,74	16,70	8,09	< ld	12,71	2,50
	0,02	< ld	0,60	0,50	0,24	1,60	0,87	21,70	9,18	< ld	14,09	3,50
Arenoso	0,00	< ld	0,03	0,10	0,00	0,30	0,02	1,60	0,55	0,40	0,85	< ld
	0,00	< ld	0,07	0,10	0,01	0,50	0,01	4,30	0,89	0,80	1,28	0,40
	0,01	< ld	0,26	0,10	0,09	1,00	0,35	7,30	4,15	0,70	6,05	1,50
	0,01	< ld	0,33	0,40	0,12	1,00	0,41	9,90	5,12	1,10	6,92	5,50
	0,02	< ld	0,61	0,30	0,26	1,20	1,01	18,90	9,13	1,20	14,36	< ld

< ld = Abaixo do limite de detecção do EAA.

Quadro 8. Somatório de cátions adsorvidos em mmol kg⁻¹ e porcentagem de cada cátion metálico adsorvido no complexo de adsorção

Solos	Σq (mmol kg ⁻¹)	Cátions metálicos (%)					
		Cd ²⁺	Ni ²⁺	Pb ²⁺	Cr ³⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺
Argiloso	0,00	0,56	5,26	10,99	66,45	5,19	11,54
	0,01	0,25	1,53	7,36	67,04	12,44	11,37
	0,02	0,10	4,24	9,15	65,69	15,34	5,49
	0,02	0,37	2,03	6,92	78,81	0,00	11,87
	0,03	0,05	1,89	5,86	79,27	0,00	12,93
Arenoso	0,00	0,09	5,32	11,72	67,05	15,81	0,00
	0,01	0,05	0,89	7,58	71,44	12,97	7,07
	0,01	0,02	1,20	9,26	68,88	6,31	14,33
	0,02	0,51	1,13	7,20	87,37	0,00	3,79
	0,02	0,06	1,22	5,71	87,67	5,35	0,00

3.5 Efeito da aplicação de doses crescentes de lodo nas características químicas e físicas do solo

Com base nos dados demonstrados nos Quadros 9 e 10 verificou-se que não houve efeito significativo da aplicação de doses crescentes de lodo sobre os teores de K, Na e ADA.

Conforme apresentado anteriormente, os lodos não se configuraram como fontes potenciais de K aos solos, devendo ser realizada a fertilização complementar com o intuito de se evitar reflexos negativos na produtividade (SAMARAS et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2004; ROSS et al., 1990; MELO et al., 1997).

Pelo fato do lodo Vila Maria advir de um processo de floculação com a utilização de cloreto férrico, esperava-se que os valores de ADA diminuíssem na medida em que fossem aplicadas doses crescentes de lodo aos solos, contudo não foi observado efeito significativo deste resíduo sobre a floculação das argilas.

Diversos trabalhos (TAMANINI et al., 2005; BARBOSA, et al., 2007; MARIN et al., 2010) relatam a eficiência do lodo em aumentar o pH e diminuir a acidez potencial (H+Al) dos solos em razão da alcalinidade dos materiais utilizados, uma vez que no processo de calagem são adicionados cal aos lodos objetivando a eliminação de patógenos e a estabilização do resíduo. Contudo, neste estudo apenas a aplicação do lodo Morro Alto a partir da dose 10 t ha⁻¹ foi capaz de aumentar significativamente o pH do solo argiloso, o que não refletiu diretamente na diminuição da acidez potencial deste solo. A diminuição da acidez potencial foi observada apenas para o solo argiloso quando se aplicou os lodos Vespasiano (10 t ha⁻¹) e Nova Pampulha (25 t ha⁻¹).

Como os lodos apresentavam altos teores de carbono orgânico (Quadro 4), esperava-se que na medida em que fossem aplicadas maiores doses desses resíduos, maior seria o incremento de matéria orgânica nos solos. No entanto, este comportamento foi observado apenas para o lodo Nova Pampulha no solo arenoso, a

partir da dose 75 t ha⁻¹. Possivelmente, o tempo de incubação não foi suficiente para proporcionar este incremento de matéria orgânica nos solos ou a decomposição da matéria orgânica foi favorecida pelas condições naturais.

Segundo SANCHEZ (1981) o aporte de matéria orgânica proporcionado pelo lodo de esgoto é especialmente importante para os solos tropicais, em que a temperatura favorece a decomposição da matéria orgânica, tornando mais difícil manter elevados teores. Além disso, a matéria orgânica é frequentemente a maior fonte de cargas negativas nos solos tropicais, sendo sua manutenção extremamente importante na retenção de cátions disponíveis no solo.

No que tange aos macronutrientes, P e N, o incremento de P foi significativo apenas para o solo arenoso sob aplicação do lodo Vespasiano (a partir da dose 75 t ha⁻¹), enquanto o aumento do teor de N foi significativo para o solo argiloso sob tratamento com o lodo Nova Pampulha (a partir da dose 75 t ha⁻¹) e com o Lodo Vila Maria (a partir da dose 50 t ha⁻¹).

Pontualmente, observa-se pelos dados do Quadros 9 que os lodos Vespasiano, Nova Pampulha e Vila Maria contribuíram para o aumento do teor de Ca (a partir das doses 50 t ha⁻¹, 50 t ha⁻¹ e 75 t ha⁻¹, respectivamente) e para o teor de Mg (a partir das doses 75 t ha⁻¹, 50 t ha⁻¹ e 75 t ha⁻¹, respectivamente) no solo argiloso. Enquanto no solo arenoso houve aumento significativo apenas de Ca quando se utilizou o lodo Vespasiano e o lodo Morro Alto, ambos a partir da dose 50 t ha⁻¹. Verifica-se ainda, que tais incrementos contribuíram para o aumento da soma de bases dos solos.

Com base nos resultados demonstrados nas Figuras 11 e 12 verificou-se que todos os lodos foram fontes de Zn e Mn para os solos. Além disso, com o incremento nas doses de lodos aplicadas aos solos observou-se que a quantidade de Zn e Mn extraídos por DTPA foi maior, exceto para o teor de Mn no solo arenoso via lodo Vila Maria, em que o efeito das doses não foi significativo. Observa-se ainda pelas Figuras 11 e 12 que a extração de Zn e Mn por DTPA foi similar para os solos.

Tendo em vista os dados apresentados nos Quadros 9 e 10 e nas Figuras 11 e 12 conclui-se que, em geral, os efeitos da adição dos lodos foi melhor observado no solo argiloso quando comparado ao solo arenoso.

Quadro 9. Características químicas e físicas do solo argiloso submetido a doses crescentes de lodos e ao cultivo de milho

Dose	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	K	Na	Ca	Mg cmol _c dm ⁻³	H+Al	SB	(T)	V %	MO dag kg ⁻¹	P-rem mg L ⁻¹	N dag kg ⁻¹	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	ADA kg kg ⁻¹
Lodo Vespasiano															
0	4,28*	3,7*	0,09*	0,01*	0,25 a	0,17 a	13,8 a	0,52 a	14,32 ab	3,6 a	6,41*	22,3 a	0,23*	2,05*	0,13*
10	4,77*	9,4*	0,06*	0,08*	0,86 a	0,17 a	12,4 b	1,17 a	13,60 a	8,5 ab	6,01*	16,5 b	0,22*	1,56*	0,13*
25	4,57*	24,5*	0,05*	0,11*	1,59 ab	0,19 a	12,4 b	1,94 a	14,40 ab	13,4 bc	6,45*	15,4 b	0,24*	1,47*	0,12*
50	4,60*	64,0*	0,06*	0,21*	2,34 bc	0,25 ab	12,5 b	2,86 b	15,36 bc	18,6 cd	6,72*	17,9 ab	0,29*	1,23*	0,12*
75	4,67*	34,0*	0,07*	0,35*	3,14 c	0,36 bc	12,6 b	3,92 bc	16,49 cd	23,8 d	7,33*	17,7 b	0,31*	0,94*	0,10*
100	4,67*	27,8*	0,08*	0,49*	3,70 c	0,40 c	12,6 b	4,67 c	17,30 d	27,0 d	7,68*	18,7 ab	0,30*	0,75*	0,13*
Lodo Morro Alto															
0	4,28 a	3,7*	0,09*	0,01*	0,25*	0,17*	13,8*	0,52*	14,32 a	3,6*	6,41*	22,3 a	0,23*	2,05*	0,13*
10	5,02 b	7,1*	0,06*	0,04*	0,26*	0,17*	12,1*	0,52*	12,65 b	4,1*	5,97*	12,0 b	0,23*	1,56*	0,14*
25	5,05 b	8,5*	0,04*	0,05*	0,34*	0,18*	12,3*	0,62*	12,92 b	4,7*	6,06*	11,4 b	0,22*	1,63*	0,13*
50	5,05 b	11,5*	0,06*	0,07*	0,59*	0,25*	12,2*	0,97*	13,17 b	7,4*	5,89*	13,3 b	0,24*	1,59*	0,13*
75	5,10 b	21,2*	0,09*	0,12*	0,83*	0,32*	12,0*	1,36*	13,40 b	10,1*	5,84*	15,2 b	0,25*	1,27*	0,17*
100	5,01 b	53,1*	0,21*	0,24*	1,06*	0,45*	11,3*	1,94*	13,24 b	14,7*	6,06*	17,1 b	0,27*	0,88*	0,16*
Lodo Nova Pampulha															
0	4,28*	3,7*	0,09*	0,01*	0,25 a	0,17 a	13,8 a	0,52 a	14,32*	3,6 a	6,41*	22,3 a	0,23 a	2,05*	0,13*
10	4,71*	6,2*	0,09*	0,04*	0,46 a	0,19 ab	12,9 a	0,79 a	13,69*	5,8 a	6,32*	16,2 b	0,25 a	1,53*	0,14*
25	4,68*	9,5*	0,09*	0,07*	1,01 ab	0,26 ab	12,0 b	1,43 ab	13,47*	10,7 ab	6,63*	15,9 b	0,30 a	1,24*	0,14*
50	4,64*	34,0*	0,07*	0,10*	1,54 bc	0,35 bc	11,9 b	2,06 bc	14,00*	14,7 bc	7,02*	18,6 ab	0,33 ab	1,04*	0,13*
75	4,64*	46,1*	0,11*	0,14*	1,83 bc	0,47 cd	12,0 b	2,55cd	14,58*	17,5 bc	7,07*	20,5 a	0,38 b	0,78*	0,15*
100	4,67*	34,3*	0,16*	0,17*	2,31 c	0,57 d	11,8 b	3,19 d	14,99*	21,3 c	7,59*	21,1 a	0,42 b	0,88*	0,13*
Lodo Vila Maria															
0	4,28*	3,7*	0,09*	0,01*	0,25 a	0,17 a	13,8*	0,52 a	14,32*	3,6 a	6,41*	22,3*	0,23 a	2,05 a	0,13*
10	4,46*	11,7*	0,09*	0,03*	0,49 a	0,16 a	12,8*	0,77 a	13,60*	5,7 a	6,50*	15,9*	0,26 ab	1,66 ab	0,13*
25	4,34*	16,7*	0,09*	0,05*	0,96 a	0,18 a	13,5*	1,29 a	14,82*	8,7 ab	6,94*	15,6*	0,30abc	1,66 ab	0,12*
50	4,27*	10,9*	0,09*	0,07*	1,68 ab	0,22 ab	13,1*	2,05 ab	15,12*	13,6 bc	6,59*	27,9*	0,31 bc	1,37 bc	0,14*
75	4,31*	35,9*	0,10*	0,08*	2,75 b	0,26 bc	13,8*	3,19 b	16,99*	18,8 bc	6,98*	22,6*	0,37 cd	1,37 bc	0,10*
100	4,31*	71,9*	0,09*	0,09*	2,80 b	0,31 c	12,8*	3,30 b	16,07*	20,5 c	7,03*	16,8*	0,39 d	0,98 c	0,06*

Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

* : Não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

pH em água – Relação 1:2,5

K, Na, P – Extrator HCl 0,5 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich 1) – Relação 1:10

Ca-Mg – Extrator KCl 1 mol L⁻¹ – Relação 1:10

H+Al – Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0 – Relação 1:10

SB = Soma de bases trocáveis

CTC (T) = Capacidade de troca catiônica a pH 7,0

V = Índice de saturação de bases

MO - Matéria orgânica (MO = 1,724 * CO)

CO – Carbono orgânico – Extrator K₂Cr₂O₇+H₂SO₄+FeSO₄ . 7H₂O

P-rem - Fósforo remanescente

N - Nitrogênio total

Al³⁺ - Alumínio trocável

ADA – Argila Dispersa em Água

Quadro 10. Características químicas e físicas do solo arenoso submetido a doses crescentes de lodos e ao cultivo de milho

Dose	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	K	Na	Ca	Mg cmol _c dm ⁻³	H+Al	SB	(T)	V %	MO dag kg ⁻¹	P-rem mg L ⁻¹	N dag kg ⁻¹	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	ADA kg kg ⁻¹
Lodo Vespasiano															
0	4,80*	1,4 a	0,08*	0,02*	0,11 a	0,13*	10,5*	0,34 a	10,80*	3,1 a	3,99*	23,5*	0,18*	1,40*	0,14*
10	4,72*	11,3 a	0,05*	0,07*	0,72 ab	0,14*	10,7*	0,97 ab	11,67*	8,3 ab	4,74*	21,1*	0,18*	1,37*	0,12*
25	4,67*	41,5 ab	0,05*	0,11*	1,42 abc	0,16*	10,2*	1,74 abc	11,97*	14,6 abc	4,65*	21,3*	0,19*	1,01*	0,13*
50	4,84*	81,5 abc	0,06*	0,13*	2,08 bcd	0,26*	10,9*	2,53 bcd	13,43*	18,8 bcd	5,18*	20,7*	0,21*	1,27*	0,11*
75	4,86*	118,5 bc	0,07*	0,24*	2,55 cd	0,28*	9,8*	3,14 cd	12,98*	24,2 cd	5,05*	18,8*	0,24*	0,78*	0,10*
100	4,99*	152,4 c	0,07*	0,31*	3,23 d	0,35*	9,2*	3,96 d	13,19*	30,0 d	5,14*	21,6*	0,26*	0,58*	0,12*
Lodo Morro Alto															
0	4,80*	1,4*	0,08*	0,02*	0,11 a	0,13*	10,5*	0,34 a	10,80*	3,1 a	3,99*	23,5*	0,18*	1,40*	0,14*
10	4,58*	5,1*	0,04*	0,02*	0,37 ab	0,18*	10,3*	0,60 ab	10,94*	5,5 ab	4,61*	19,0*	0,17*	1,53*	0,11*
25	4,58*	4,9*	0,03*	0,02*	0,39 abc	0,16*	10,1*	0,61 ab	10,71*	5,7 ab	4,57*	19,0*	0,18*	1,46*	0,11*
50	4,87*	12,3*	0,05*	0,06*	0,72 bcd	0,24*	10,4*	1,07 bc	11,50*	9,4 bc	4,83*	17,8*	0,17*	1,20*	0,14*
75	4,70*	21,5*	0,06*	0,09*	0,83 cd	0,26*	10,6*	1,24 bc	11,84*	10,4 bc	4,79*	20,6*	0,19*	1,43*	0,13*
100	4,85*	26,9*	0,08*	0,18*	1,04 d	0,34*	9,4*	1,64 c	11,04*	14,8 c	4,74*	19,8*	0,20*	0,91*	0,13*
Lodo Nova Pampulha															
0	4,80*	1,4*	0,08*	0,02*	0,11*	0,13*	10,5*	0,34*	10,80*	3,1*	3,99 a	23,5*	0,18*	1,40*	0,14*
10	4,90*	16,7*	0,11*	0,07*	1,07*	0,32*	8,8*	1,57*	10,40*	14,7*	4,65 ab	17,3*	0,24*	0,94*	0,11*
25	4,69*	10,6*	0,08*	0,03*	0,77*	0,23*	10,0*	1,09*	11,09*	9,9*	4,83 ab	20,4*	0,22*	1,01*	0,12*
50	4,74*	14,8*	0,11*	0,07*	1,25*	0,33*	8,9*	1,76*	10,66*	16,5*	4,87 ab	22,1*	0,22*	0,65*	0,12*
75	4,70*	25,5*	0,13*	0,12*	1,84*	0,45*	8,8*	2,56*	11,39*	22,4*	5,22 b	22,7*	0,30*	0,46*	0,14*
100	4,75*	36,6*	0,19*	0,18*	2,27*	0,56*	8,6*	3,19*	11,79*	27,0*	5,62 b	22,4*	0,31*	0,65*	0,13*
Lodo Vila Maria															
0	4,80*	1,4*	0,08*	0,02*	0,11*	0,13*	10,5*	0,34 a	10,80*	3,1 a	3,99*	23,5*	0,18*	1,40*	0,14*
10	4,76*	11,3*	0,07*	0,02*	0,40*	0,13*	9,8*	0,62 ab	10,38*	5,9 a	3,86*	24,4*	0,18*	1,20*	0,12*
25	4,28*	4,7*	0,07*	0,01*	0,91*	0,17*	11,2*	1,16 ab	12,32*	9,4 ab	4,34*	28,3*	0,20*	1,27*	0,10*
50	4,22*	36,3*	0,08*	0,01*	1,37*	0,19*	11,5*	1,65 abc	13,18*	12,4 ab	4,96*	22,8*	0,21*	1,34*	0,12*
75	4,11*	79,1*	0,10*	0,02*	2,34*	0,25*	11,3*	2,71 bc	14,04*	19,3 bc	5,09*	33,6*	0,26*	1,11*	0,09*
100	4,14*	81,5*	0,12*	0,02*	3,32*	0,30*	11,5*	3,75 c	15,25*	24,5 c	5,14*	29,3*	0,28*	1,01*	0,02*

Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

* : Não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

pH em água – Relação 1:2,5

K, Na, P – Extrator HCl 0,5 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich 1) – Relação 1:10

Ca-Mg – Extrator KCl 1 mol L⁻¹ – Relação 1:10

H+Al – Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0 – Relação 1:10

SB = Soma de bases trocáveis

CTC (T) = Capacidade de troca catiônica a pH 7,0

V = Índice de saturação de bases

MO – Matéria orgânica (MO = 1,724 * CO)

CO – Carbono orgânico – Extrator K₂Cr₂O₇+H₂SO₄+FeSO₄ . 7H₂O

P-rem – Fósforo remanescente

N – Nitrogênio total

Al³⁺ – Alumínio trocável

ADA – Argila Dispersa em Água

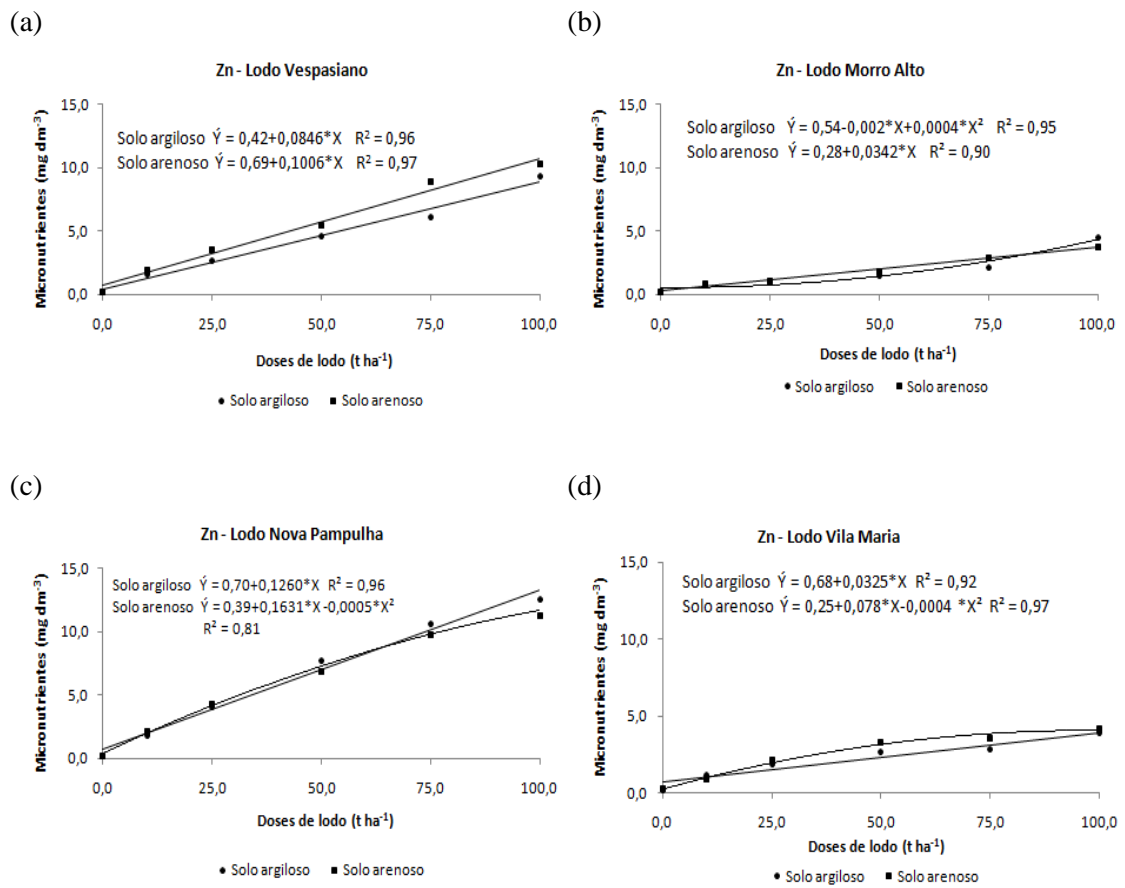


Figura 11. Teor de Zn extraído por DTPA e adicionado aos solos pelos lodos (a) Vespasiano, (b) Morro Alto, (c) Nova Pampulha e (d) Vila Maria.

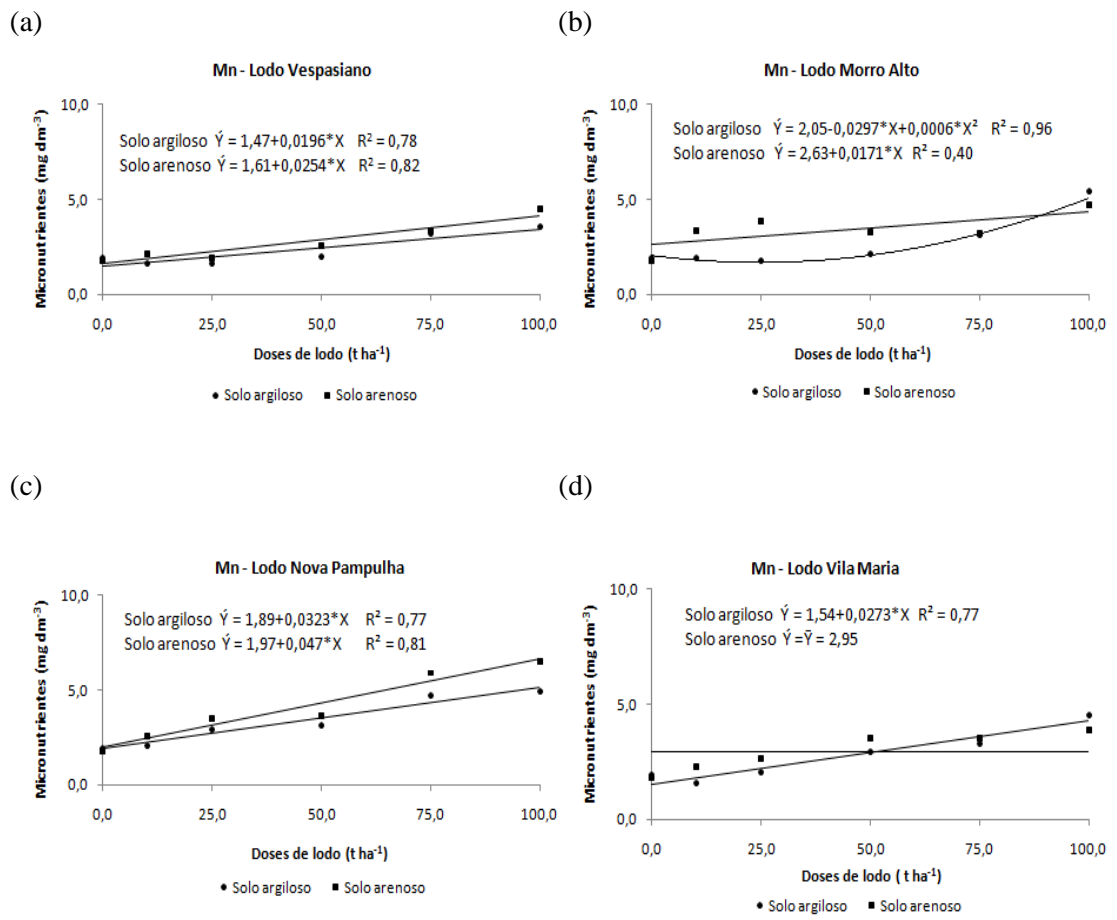


Figura 12. Teor de Mn extraído por DTPA e adicionado aos solos pelos lodos (a) Vespasiano, (b) Morro Alto, (c) Nova Pampulha e (d) Vila Maria.

3.6 Efeito da aplicação de lodo na produção de matéria seca de milho

A produção de matéria seca de milho respondeu significativamente às doses de lodos adicionadas em ambos os solos, indicando desta forma o potencial fertilizante do resíduo, exceto para o lodo Vila Maria.

O efeito resultante da aplicação do lodo Vila Maria se deve provavelmente ao selamento que este provocou na superfície dos vasos, impedindo que a água infiltrasse e que as raízes do milho penetrassem com facilidade. Este comportamento foi causado pela adição de cloreto férrico na formação dos flocos e conseqüente separação dos sólidos da fração líquida do esgoto pelo processo de flotação.

Considerando os efeitos dos lodos sobre a fertilidade do solo, era esperado o aumento da produção de matéria seca na medida em que fossem aplicadas maiores doses dos resíduos. Contudo, este comportamento foi verificado apenas para os lodos Vespasiano e Nova Pampulha. A produção de matéria seca. Em relação ao lodo Morro Alto, seguiu uma tendência quadrática para ambos os solos decrescendo a partir das doses 50 t ha^{-1} e 75 t ha^{-1} , para o solo argiloso e arenoso, respectivamente.

Com base na Figura 13, verifica-se que para os dois solos a produção de matéria seca foi maior para o lodo Vespasiano, este comportamento se deve possivelmente ao maior efeito observado da aplicação deste resíduo sob as características químicas dos solos, conforme Quadros 9 e 10.

Tanto para o lodo Vespasiano quanto para o lodo Nova Pampulha, a produção de matéria seca foi menor utilizando o solo arenoso, isso se deve possivelmente a menor disponibilidade de nutrientes conforme Quadros 9 e 10 e a maior mobilidade e interferência dos metais pesados neste tipo de solo.

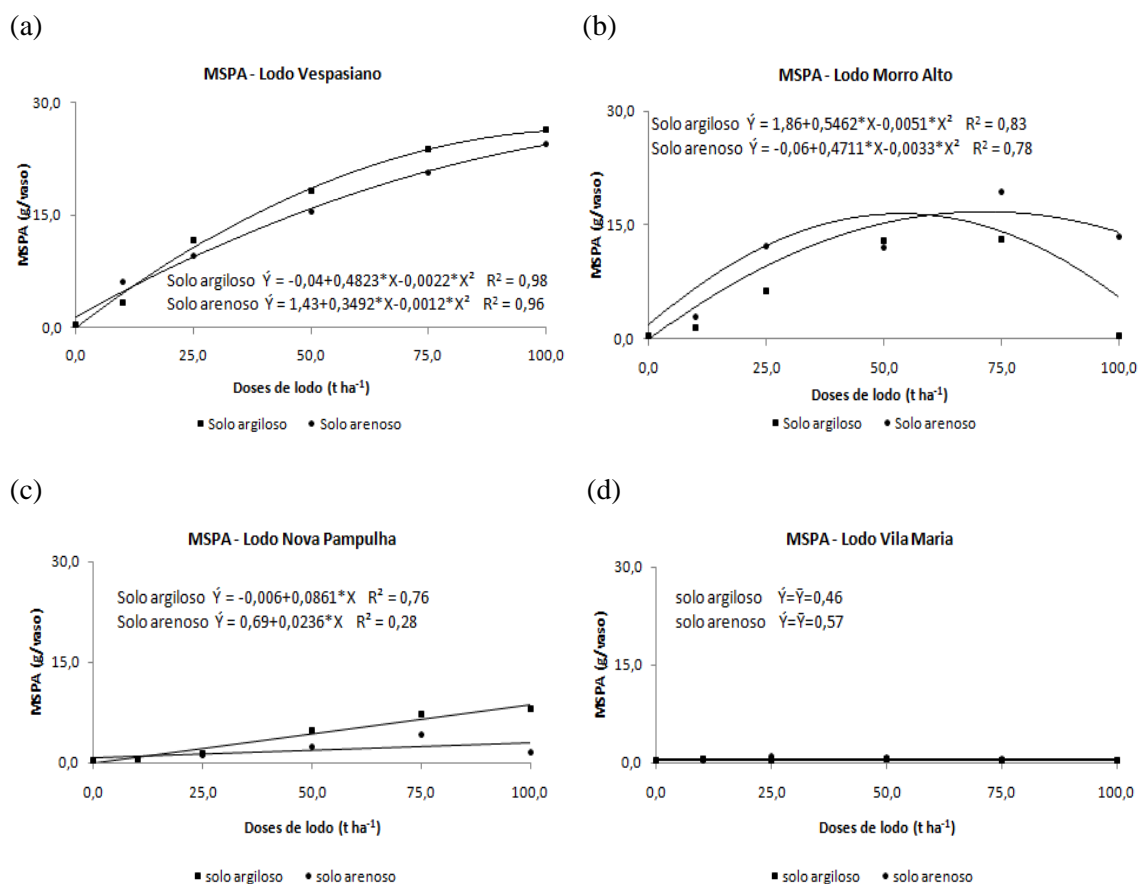


Figura 13. Matéria seca da parte aérea de plantas de milho cultivadas com lodo de esgoto.

3.7 Efeito da aplicação de lodo na concentração de micronutrientes e metais pesados na planta

No que tange ao conteúdo de Mn e Zn nas folhas de milho (Figuras 14 e 15) verificou-se que, em geral, os resultados foram significativos ao aumento das doses de lodos aplicadas ao solo argiloso e arenoso, exceto para o lodo Vila Maria.

Na medida em que foram aplicadas doses crescentes dos lodos Vespasiano e Nova Pampulha no solo argiloso, o conteúdo de Mn e Zn nas folhas de milho aumentaram. Em relação à aplicação do lodo Morro Alto no solo argiloso observou-se que os conteúdos de Mn e Zn diminuíram a partir da dose 50 t ha^{-1} . Para o lodo Vila Maria, a produção de matéria seca não respondeu significativamente ao aumento das doses e conseqüentemente o conteúdo dos metais também não foi significativo.

Em relação ao conteúdo de Mn e Zn nas plantas cultivadas no solo arenoso, observou-se que, em geral, o aumento nas doses aplicadas dos lodos Vespasiano e Morro Alto proporcionou maior absorção desses elementos pelas plantas.

Contudo, nota-se que o conteúdo de Mn nas folhas das plantas de milho tratadas com os lodos Nova Pampulha e Vila Maria não responderam significativamente à aplicação de maiores doses do resíduo ao solo. Além disso, para o lodo Vila Maria, o

efeito das doses sobre o conteúdo de Zn também não foi significativo.

Esta maior absorção de Mn e Zn pelas folhas de milho, se comparado aos metais Cd, Pb, Ni e Cr (Figuras 16, 17 e 18) evidencia a maior disponibilidade desses elementos, em função das doses aplicadas e do teor relativamente elevado nos lodos (Quadro 4).

Quanto aos conteúdos de Cd, Cr, Ni e Pb nas folhas de milho (Figuras 16, 17 e 18), apenas o Cd, elemento que se apresenta em baixas concentrações nos resíduos, não foi detectado em nenhum ensaio, indicando portanto baixo risco de contaminação das plantas. Entretanto, não significa que o Cd estava ausente no material vegetal, e sim que sua concentração estava abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica.

O conteúdo de Cr, Ni e Pb nas folhas advindos do tratamento com os lodos Vespasiano e Nova Pampulha aumentaram na medida em que foram sendo aplicadas maiores doses dos resíduos.

Em relação aos conteúdos de Cr, Ni e Pb nas folhas tratadas com os lodos Morro Alto e Vila Maria, verificou-se que a absorção desses elementos pelas plantas seguiu a mesma tendência observada para a produção de matéria seca em função das doses. Desta forma, notou-se que a partir da dose 50 t ha⁻¹ de lodo Morro Alto aplicada ao solo argiloso, os conteúdos dos metais decresceram nas folhas de milho. Enquanto os conteúdos dos metais nas folhas das plantas tratadas com o lodo Vila Maria não responderam significativamente ao incremento das doses aplicadas, pois não houve produção significativa de matéria seca.

Além disso, a absorção dos metais pelas plantas cultivadas no solo argiloso seguiram a sequência: Cr > Pb > Ni, como era esperado, uma vez que os lodos apresentavam em sua constituição concentração desses metais seguindo esta mesma ordem (Quadro 4).

Contudo, é importante ressaltar que embora o conteúdo de Cr nas folhas fosse maior que o de Pb e que o de Ni, essa diferença não foi tão significativa quando levado em consideração as concentrações desses metais nos lodos. Conforme previsto pelo ensaio de adsorção competitiva, o Cr foi adsorvido em maior quantidade que o Pb e que o Ni.

Analisando os dados referentes aos conteúdos dos metais Cr, Pb e Ni nas folhas de milho cultivado no solo arenoso, observa-se que o comportamento foi distinto ao das folhas cultivadas no solo argiloso (Figuras 16, 17 e 18). Além disso, verificou-se que em geral o acúmulo desses metais pelas folhas foi maior quando se utilizou o solo arenoso. Esse comportamento era previsto, uma vez que os ensaios de adsorção previamente realizados demonstraram que a adsorção de Cr, Pb e Ni foi menor para o solo mais arenoso.

Verificou-se ainda que apenas os conteúdos dos metais advindos dos tratamentos com os lodos Vespasiano e Morro Alto responderam significativamente ao aumento das doses no solo arenoso, exceto para o conteúdo de Ni advindo do lodo Morro Alto. Em relação à aplicação dos lodos Nova Pampulha e Vila Maria não foi observado efeito significativo das doses sobre o conteúdo de Cr, Pb e Ni nas folhas de milho.

Além disso, a absorção desses metais pelas plantas tratadas com os lodos Morro

Alto e Vila Maria seguiram a mesma tendência da produção de matéria seca em função das doses. Sendo que a partir da dose 75 t ha⁻¹ de lodo Morro Alto aplicada ao solo arenoso, os conteúdos dos metais decresceram nas folhas de milho. Enquanto os conteúdos dos metais nas folhas das plantas tratadas com o lodo Vila Maria não responderam significativamente ao incremento das doses.

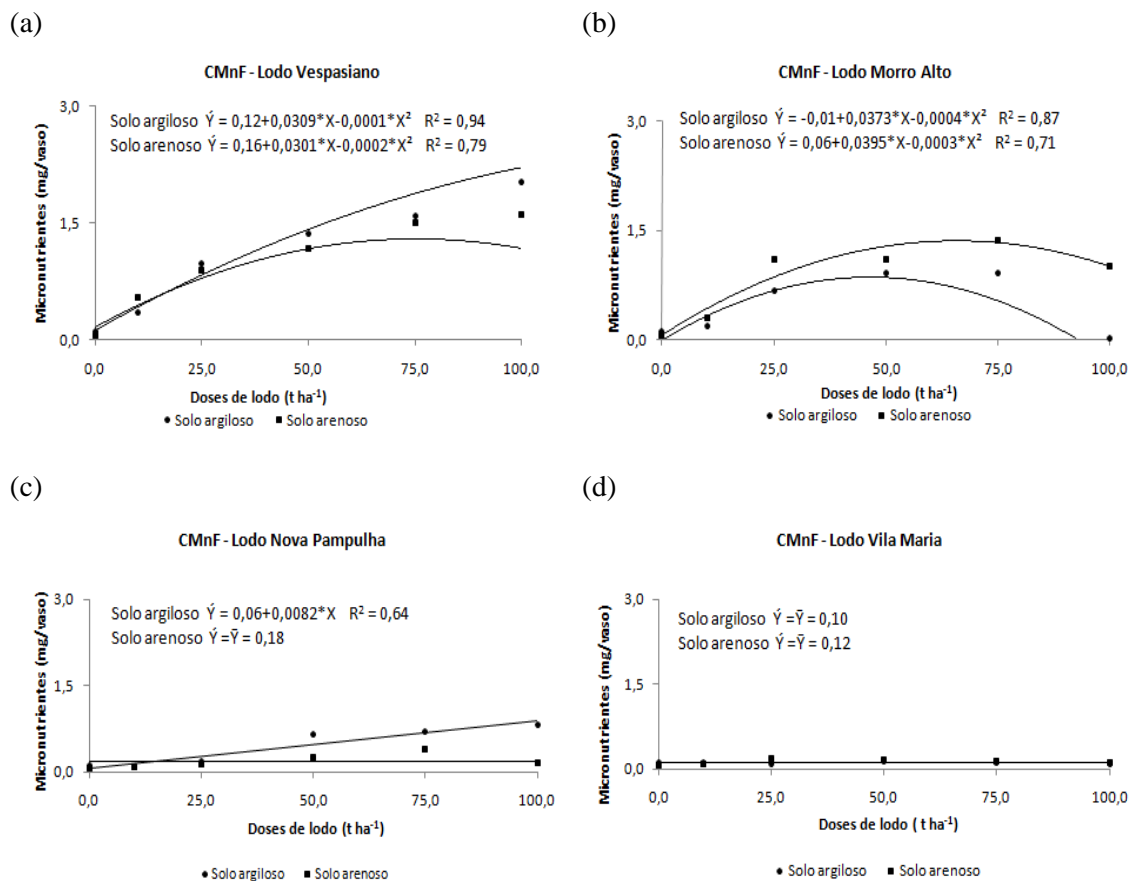


Figura 14. Conteúdo de Mn nas plantas de milho tratadas com doses crescentes de lodo.

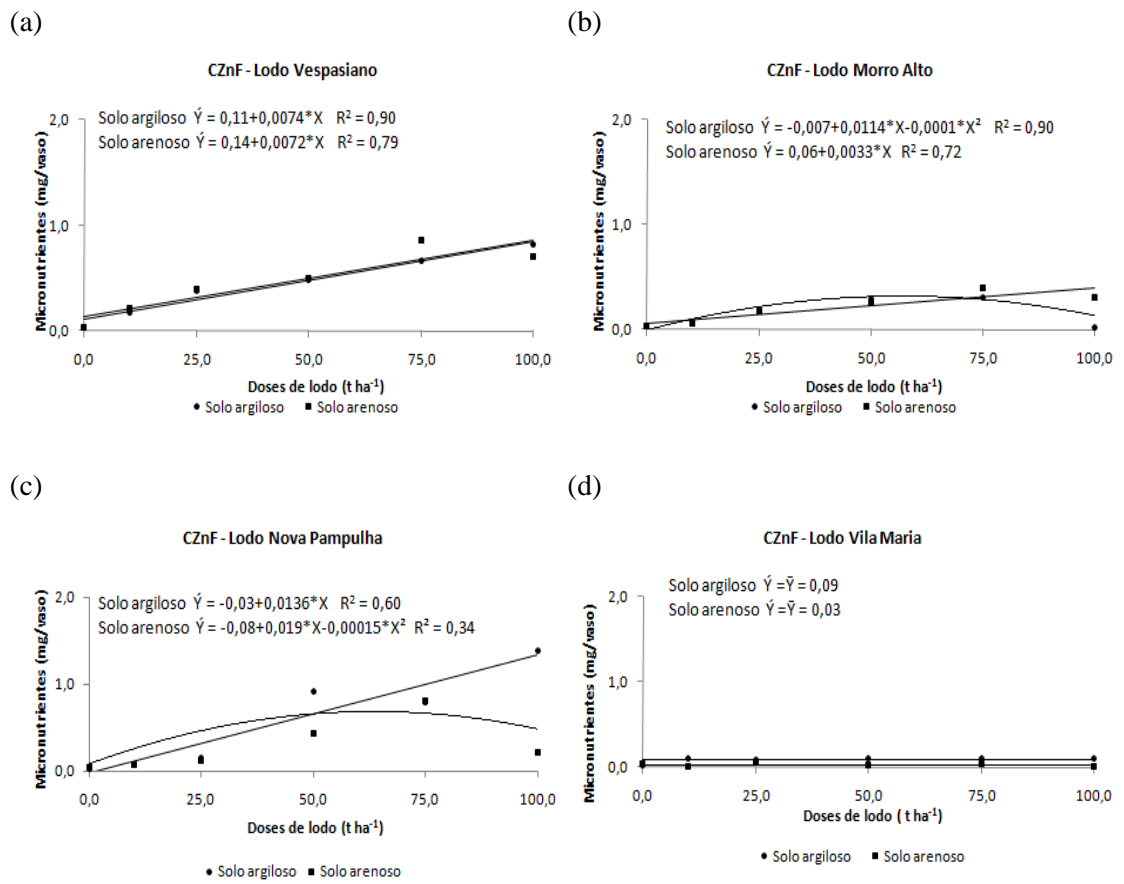
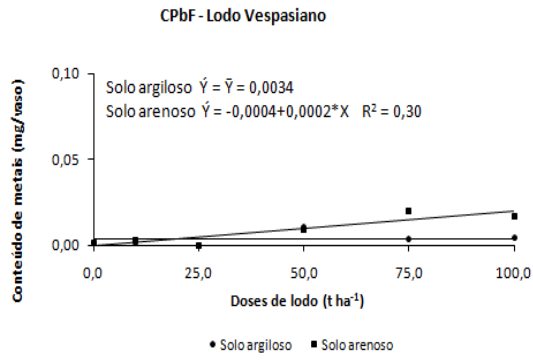
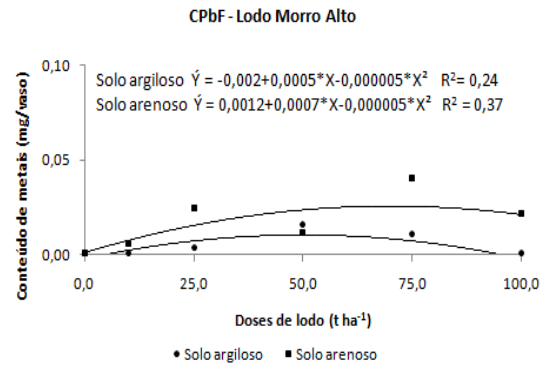


Figura 15. Conteúdo de Zn nas plantas de milho tratadas com doses crescentes de lodo.

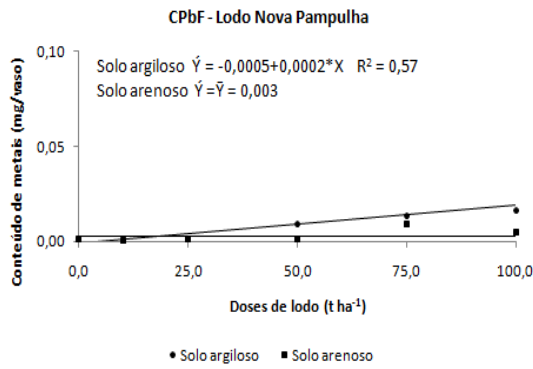
(a)



(b)



(c)



(d)

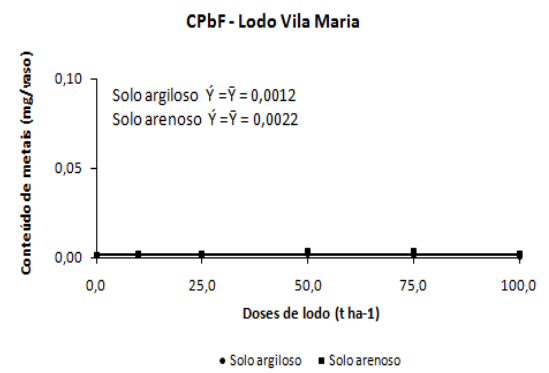
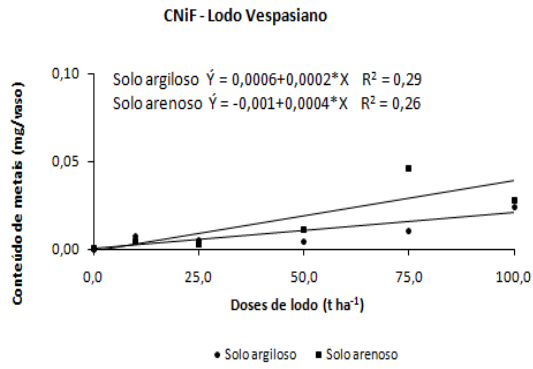
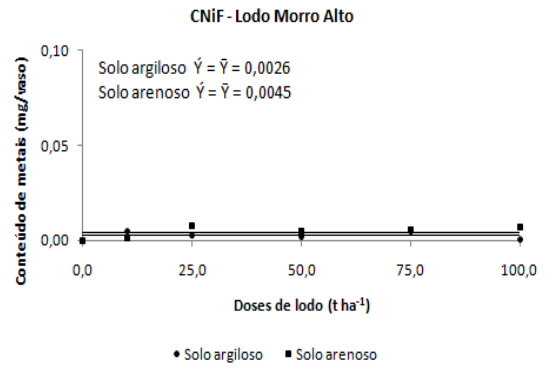


Figura 16. Conteúdo de Pb nas plantas de milho tratadas com doses crescentes de lodo.

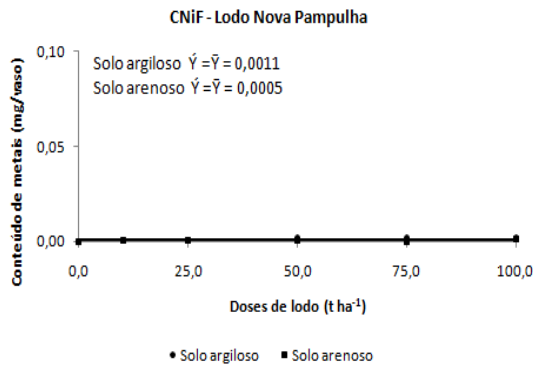
(a)



(b)



(c)



(d)

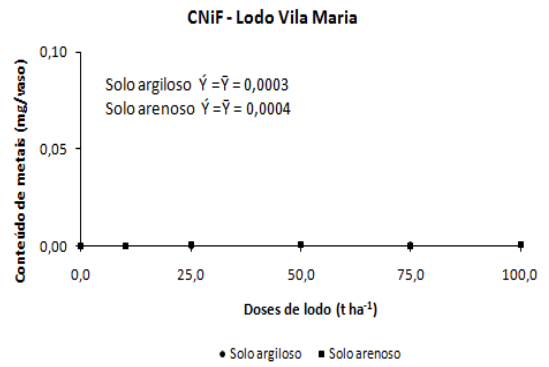


Figura 17. Conteúdo de Ni nas plantas de milho tratadas com doses crescentes de lodo.

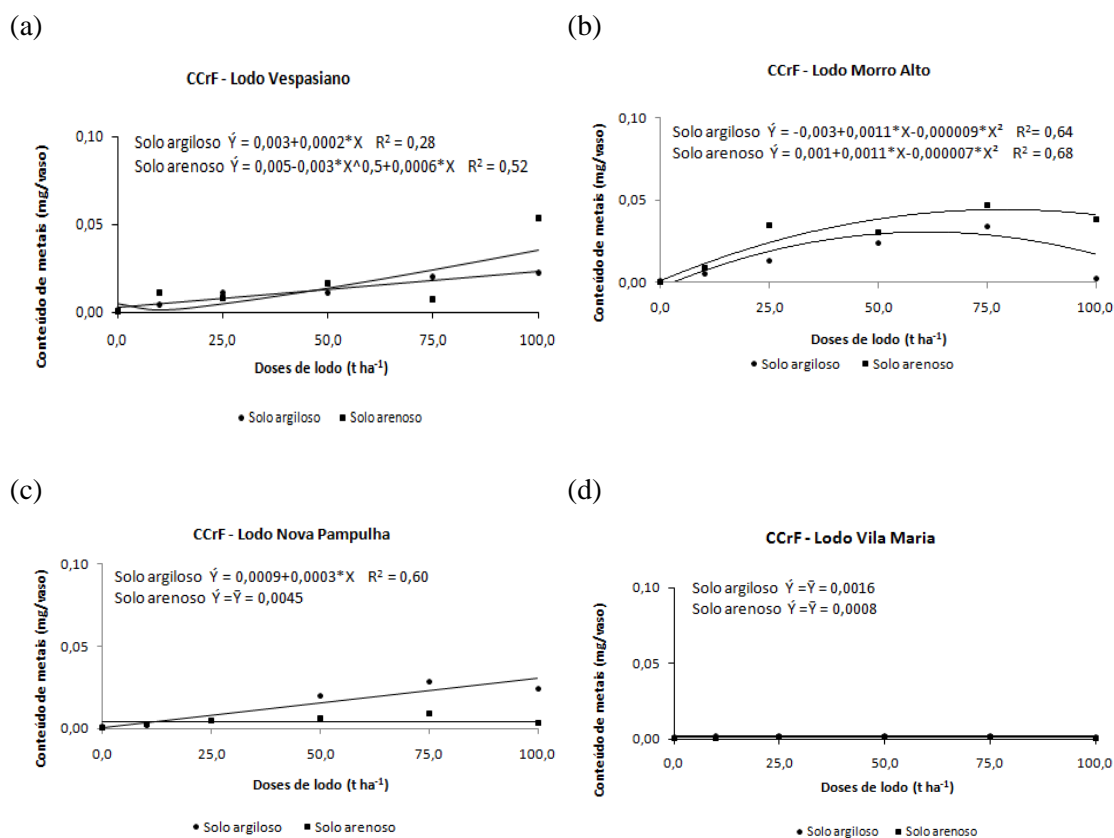


Figura 18. Conteúdo de Cr nas plantas de milho tratadas com doses crescentes de lodo.

3.8 Efeito da aplicação de lodos na concentração de metais pesados nos solos

No que tange ao efeito da aplicação do lodo Vespasiano nos dois tipos de solos, verificou-se que os teores dos metais Cr, Ni e Pb extraídos por DTPA aumentaram significativamente com a adição de maiores doses (Figuras 19, 20 e 21).

Para o lodo Morro Alto o efeito da aplicação de doses crescentes também foi significativa para os metais, exceto para o Cr avaliado no solo arenoso. Além disso, observou-se que o Cr a partir da dose 50 t ha⁻¹ tornou-se menos disponível no solo argiloso.

Observando as Figuras 19, 20 e 21 percebe-se que o teor de Pb disponível foi maior que os teores de Cr e Ni quando aplicou-se o lodo Nova Pampulha aos dois tipos de solos. Embora o lodo Nova Pampulha não apresentasse teor total de Pb maior que os outros lodos, pôde-se notar que este elemento tornou-se mais disponível ao solo e à planta quando utilizou-se o resíduo Nova Pampulha. Esta maior disponibilidade do Pb quando utilizado este lodo pode ter sido causa da menor produção de matéria seca proporcionada pelo resíduo quando comparada àquela obtida pelo lodo Vespasiano. Além disso, como previamente discutido, o lodo Nova Pampulha foi o único resíduo que proporcionou aumento significativo da matéria orgânica no solo arenoso, o que de certa forma favoreceu a maior adsorção do Cr em relação aos demais metais e conseqüentemente a sua menor extração por DTPA.

Além disso, observou-se que a disponibilidade dos metais Cr, Pb e Ni foi menor quando utilizado o lodo Vila Maria em comparação aos demais resíduos. Este

comportamento evidencia que a menor produção de matéria seca proporcionada por este material está relacionada principalmente ao efeito no selamento do solo, e não a toxicidade causada por esses metais às plantas. Além disso, nota-se pelos gráficos que os teores de Pb para ambos os solos foi bem menor que o de Cr e de Ni, isto pois o lodo Vila Maria apresenta em sua constituição baixa concentração de Pb, como verificado no Quadro 4.

Como previsto pelos ensaios de adsorção e confirmado pela extração por DTPA, os teores disponíveis dos metais Cr, Pb e Ni foi maior para o solo mais arenoso. Por conseguinte, a possibilidade de ocorrência de lixiviação e absorção desses metais pelas plantas será menor quando utilizado o solo mais argiloso.

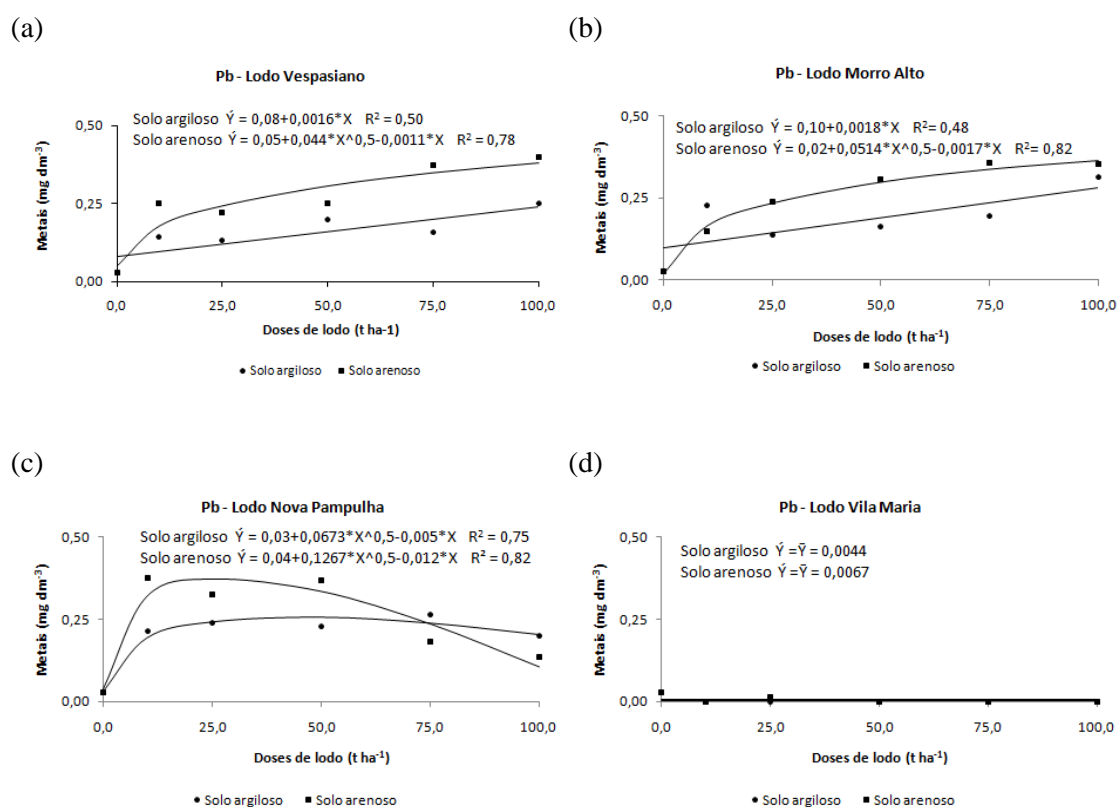


Figura 19. Teor de Pb nos solos tratados com doses crescentes de lodo.

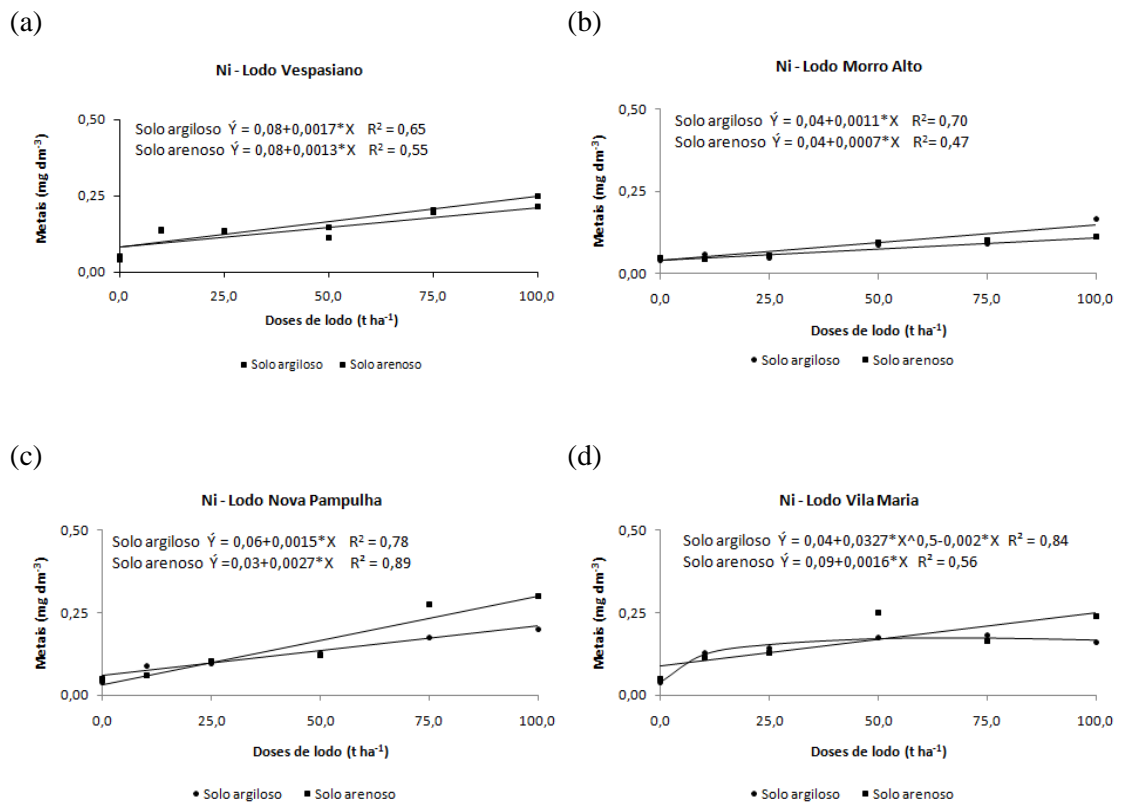


Figura 20. Teor de Ni nos solos tratados com doses crescentes de lodo.

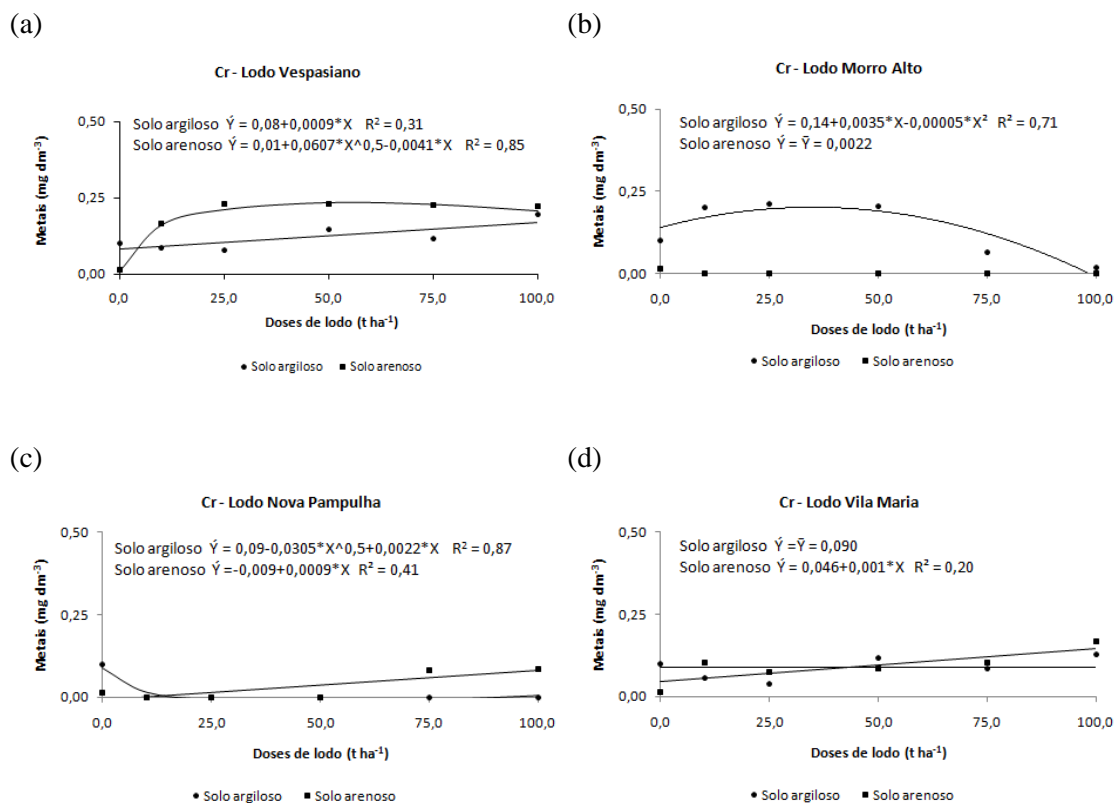


Figura 21. Teor de Cr nos solos tratados com doses crescentes de lodo.

Com base nos resultados dos efeitos da aplicação dos lodos sobre os teores de Zn, Ni, Cr e Pb no solos e nos limites de carga total acumulada dessas substâncias definidos pela Resolução CONAMA 375/2006, foram estimados o número máximo de aplicação dos lodos para cada solo, conforme Quadro 11. Este cálculo foi realizado apenas para os lodos Vespasiano, Morro Alto e Nova Pampulha, pois apresentaram efeito significativo sobre a produção de matéria seca de milho.

Tendo em vista os resultados obtidos, observou-se que os metais que limitaram o número máximo de aplicações dos resíduos aos solos foram o Zn e o Pb. Embora o Cr estivesse mais concentrado nos lodos de esgoto que o Pb, este metal se encontrou menos disponível, conforme verificado nos ensaios de adsorção e nas análises de DTPA realizadas nos resíduos.

Contudo, é válido lembrar que o cálculo realizado foi apenas uma estimativa. Desta forma, a ETE deverá monitorar os efeitos desses metais aos solos durante a utilização dos lodos e definir conforme o comportamento observado a periodicidade de aplicação.

Quadro 11. Estimativa do número total de aplicações dos resíduos aos solos

Lodo	Solo	Dose	Pb – solo (kg ha ⁻¹)	Ni-solo (kg ha ⁻¹)	Cr-solo (kg ha ⁻¹)	Zn-solo (kg ha ⁻¹)	Nº de aplicações Pb	Nº de aplicações Ni	Nº de aplicações Cr	Nº de aplicações Zn	Nº máximo de aplicações do lodo
Vespasiano	Argiloso	0	0,16	0,16	0,16	0,84	256	463	963	530	256
		10	0,19	0,19	0,18	2,53	214	381	865	176	176
		25	0,24	0,25	0,21	5,07	171	302	751	88	88
		50	0,32	0,33	0,25	9,30	128	224	616	48	48
		75	0,40	0,42	0,30	13,53	103	178	522	33	33
		100	0,48	0,50	0,34	17,76	85	148	453	25	25
Vespasiano	Arenoso	0	0,10	0,16	0,02	1,38	410	463	7700	322	322
		10	0,36	0,19	0,32	3,39	115	398	478	131	115
		25	0,49	0,23	0,42	6,41	85	329	365	69	69
		50	0,61	0,29	0,47	11,44	67	255	329	39	39
		75	0,70	0,36	0,46	16,47	59	208	337	27	27
		100	0,76	0,42	0,41	21,50	54	176	372	21	21
Morro Alto	Argiloso	0	0,20	0,08	0,28	1,08	205	925	550	412	205
		10	0,24	0,10	0,34	1,12	174	725	453	397	174
		25	0,29	0,14	0,39	1,48	141	548	392	301	141
		50	0,38	0,19	0,38	2,88	108	389	405	155	108
		75	0,47	0,25	0,24	5,28	87	302	635	84	84
		100	0,56	0,30	-	8,68	73	247	-	51	51
Morro Alto	Arenoso	0	0,04	0,08	0,00	0,56	410	925	35000	795	410
		10	0,33	0,09	0,00	1,24	115	787	35000	358	115
		25	0,47	0,12	0,00	2,27	85	643	35000	196	85
		50	0,60	0,15	0,00	3,98	67	493	35000	112	67
		75	0,68	0,19	0,00	5,69	59	400	35000	78	59
		100	0,73	0,22	0,00	7,40	54	336	35000	60	54

Quadro 11. Estimativa do número total de aplicações dos resíduos aos solos (cont.)

Lodo	Solo	Dose	Pb – solo (kg ha ⁻¹)	Ni-solo (kg ha ⁻¹)	Cr-solo (kg ha ⁻¹)	Zn-solo (kg ha ⁻¹)	Aplicação Pb	Aplicação Ni	Aplicação Cr	Aplicação Zn	Nº máximo de aplicações do lodo
Nova Pampulha	Argiloso	0	0,06	0,12	0,18	1,40	683	617	856	318	318
		10	0,39	0,15	0,03	3,92	106	493	4952	114	106
		25	0,48	0,20	-	7,70	85	379	-	58	58
		50	0,51	0,27	-	14,00	80	274	-	32	32
		75	0,48	0,35	-	20,30	86	214	-	22	22
		100	0,41	0,42	0,01	26,60	101	176	15400	17	17
Nova Pampulha	Arenoso	0	0,08	0,06	-	0,78	410	1233	-	571	410
		10	0,64	0,11	-	3,94	115	649	-	113	113
		25	0,75	0,20	0,03	8,31	85	379	5704	54	54
		50	0,67	0,33	0,07	14,59	67	224	2139	31	31
		75	0,47	0,47	0,12	19,62	59	159	1316	23	23
		100	0,21	0,60	0,16	23,40	54	123	951	19	19

Limites de cargas acumuladas teóricas no solo quanto a aplicação de substância inorgânicas, conforme Resolução CONAMA 375/2006: Pb: 41 kg ha⁻¹; Cr: 154 kg ha⁻¹; Ni 74 kg ha⁻¹ e Zn 445 kg ha⁻¹.

4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

1. Os lodos de esgoto pesquisados apresentaram concentração dos metais Cd, Pb, Ni, Cr, Cu e Zn abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2006.
2. Os metais Pb e Cr encontram-se nos resíduos em formas de menor disponibilidade às plantas e ao solo, apresentando baixa taxa de recuperação com DTPA.
3. O Cr foi o metal adsorvido em maior quantidade nos ensaios de adsorção. No ensaio de adsorção competitiva o Cr fez com que os metais Cd, Ni, Pb, Mn e Zn estivessem mais disponíveis às plantas e ao solo.
4. Em geral, os efeitos da adição dos lodos sobre as características químicas dos solos foi melhor observado no solo argiloso quando comparado ao solo arenoso
5. Apenas a aplicação do lodo Vila Maria não foi significativo na produção de matéria seca de milho. A aplicação deste resíduo dificultou a absorção de água pelo solo e o desenvolvimento das raízes das plantas.
6. A absorção de Zn e Mn pelas plantas e a disponibilidade desses elementos nos solos foi maior em comparação a de Cd, Cr, Pb e Ni.
7. A disponibilidade de Pb, Cr e Ni foi maior para o solo mais arenoso.
8. Recomenda-se a aplicação de lodos de esgoto doméstico em solos com textura mais argilosa, em que há maior fornecimento de nutrientes e a disponibilidade de metais pesados é menor, quando comparado ao solo arenoso.
9. Recomenda-se a aplicação dos lodos Vespasiano, Morro Alto e Nova Pampulha após tratamento para a eliminação de patógenos e redução de odor.
10. Recomenda-se que sejam realizadas análises microbiológicas para a detecção de patógenos e análises de outros metais pesados nas amostras de lodo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; ANDRADE, J.C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (eds.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p.240-250.
- ANDREOLI, C.V.; BONNET, B.R.P.; LARA, A.I.; WOLTER, F.R. Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Estado do Paraná. *Sanare (SANEPAR)*, v.7, n.7, p.68 – 72, 1997.
- BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. *Semina: Ciências Agrárias*, v.27, n.4, p. 565 – 580, 2006.
- BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; FONSECA, I.C.B. Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 601-605, 2007.
- BARROS, I.T.; ANDREOLI, C.V.; SOUZA, I.G.; COSTA, A.C.S. Avaliação agrônômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura de milho, *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.15, p.630 - 638, 2011.
- BONNET, B.R.P.; ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; WOLTER, F.R. Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Estado do Paraná. *Sanare (SANEPAR)*, v.7, n.7, p.76 - 84, 1997.
- BRASIL. Resolução CONAMA n° 375. *Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*. 29 de agosto de 2006.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2009*. Brasília: MCIDADES, 2011. 616p.
- CASSINI, S.T.; CHERNICHARO, C.A.L.; ANDREOLI, C.V.; FRANÇA, M.; BORGES, E.S.M.; GONÇALVES, R.F. Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos. In: CASSINI, S.T. *Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás*. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 210 p.
- COMPARINI, J.B. Engenharia de aplicação dos Biossólidos. In: TSUTIYA, T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C.T.de.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. (Eds). *Biossólidos na Agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001. 405-431p.

- COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Disponível em: www.copasa.com.br
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de Métodos de Análise de Solos*. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- FONTES, M.P.F.; GOMES, P.C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. *Applied Geochemistry*, v.18, p. 795-804, 2003.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, p. 116-140, 2008.
- GOMES P.C.; FONTES, M.P.F.; SILVA, A.G.; MENDONÇA, E.S.; NETTO, A.R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 1115-1121, 2001.
- JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 4 ed. Rio de Janeiro, 2005. 932 p.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*. 3 ed. Boca Raton, Flórida, CRC Press, 2001. 331p.
- KIEHL, E. J. *Fertilizantes orgânicos*. Piracicaba: Agronômica "CERES", 1985. cap.3, 85p.
- LUDUVICE, M. *Gestão de bio-sólidos e o Mercosul*. In: Seminário sobre gerenciamento de bio-sólidos do Mercosul, 1, 1998. Anais. Curitiba, ABES, p.9-10, 1998.
- MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980, 252p.
- MARIN, L.M.K.S.; BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C.V.; CARAFINI, C.; LIMA, M.R.; SERRAT, B.M.; MOCHIDA, G.A. Determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo alcalino em solos da região metropolitana de Curitiba. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.15, n.2, p.113-118, 2010.
- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P.; COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados no perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p. 379–386, 1996.
- McBRIDE, M.B. *Environmental Chemistry of soils*. Oxford University Press, New York, 1994, 406p.

- McKEAGUE, J.A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 46, p. 13-22, 1966.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citratate system buffered with sodium bicarbonate. In: SWINEFORD, A., Ed., *Clay and clay minerals proceeding conference*. Elmsdorf, NY: Pergamon Press, 1960. p. 317 – 342.
- MELFI, A.J.; MONTES, C.R. *Impacto dos biossólidos sobre o solo*. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I. *Biossólidos na Agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E. *Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais*. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, v.26., Rio de Janeiro, 1997. Palestras. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.
- MOTA, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 2ed. Rio de Janeiro: ABES. 2000. p.416.
- NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F.; MELICIO, A.C.F.D. Copper availability as related to soil copper fractions in oxisoils under liming. *Scientia Agricola*, v.60, n.1, p.167- 173, 2003.
- NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p. 385 – 392, 2004.
- PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; OLIVEIRA, L.R.; CURI, N.; SILVA, M.L.N. Efeito da força iônica da solução de equilíbrio sobre a adsorção/dessorção de chumbo em Latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.1077-1084, 2001.
- PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; COSTA, E.T.S.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M.; FIGUEIREDO, L.F.P. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.819-826, 2007.
- PIRES, A.M.M. *Uso agrícola do lodo de esgoto: aspectos legais*. EMBRAPA Meio Ambiente, 2006.
- ROSS, C.A.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. *Utilização de lodo de esgoto como fertilizante: efeito imediato no milho e residual na associação de aveia + ervilhaca*. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, v.23., Santa Maria, 1990. Resumos. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,

1990. p.20.

- RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B.; PEREIRA, J.B.M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.389-393, 2003.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p. 297 - 300, 2005.
- SAMARAS, V.; TSADILAS, C.D.; STAMATIADIS, S. Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield, and nitrate leaching. *Agronomy Journal*, v.100, p. 477 – 483, 2008.
- SANCHEZ, P.A. *Suelos del trópico*. San José, IICA, 1981. 634 p.
- SANCHEZ MONEDERO, M.A.; MONDINI, C.; DE NOBILI, M.; LEITA, L.; ROIG, A. Land applications of biosolids. Soil response to different stabilization degree or treated organic matter. *Waste Manage*, v.24, p. 325 – 332, 2004.
- SANEPAR - COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. *Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná*. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.
- SCOTT, K. Cause and control of losses of chromium during nitric-perchloric acid oxidation of aquatic sediments. *Analyst*, Cambridge (Grã-Bretanha), v.103, p.754-758, 1978.
- SINGH, R.P.; AGRAWAL, M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, v.28, p. 347 – 358, 2008.
- SOUZA, M.L.P.; RIBEIRO, A.N.; ANDREOLI, C.V.; SOUZA, L.C.P.; BITTENCOURT, S. Aptidão das terras do Estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto. *Revista DAE - Sabesp*, v.177, p.20 - 29, 2008.
- TAMANINI, C.R.; ANDREOLI, C.V.; MOTTA, A.C.V.; DOETZER, B.H.; PEGORINI, E.S. *Estudo da utilização de altas doses de biossólido na recuperação de área decapada em São José dos Pinhais*. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. Anais. Campo Grande/MS, ABES, p.1-16, 2005.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, planta e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos. UFRGS, 1995. 174p.
- WANG, X.; CHEN, T.; GE, Y.; JIA, Y. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *Journal of Hazardous Materials*, v. 160, p. 554-558, 2008.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476, 1988.

APÊNDICE

Tabela 1: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Cd aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Cd Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,074	0,002
0,209	0,003
0,361	0,003
0,523	0,005
0,626	0,005
1,149	0,003
1,574	0,004
2,140	0,006

Tabela 2: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Cd aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Cd Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,089	0,001
0,242	0,002
0,400	0,002
0,571	0,004
0,721	0,003
1,201	0,002
1,631	0,003
2,345	0,002

Tabela 3: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Cr aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Cr Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,002	0,003
0,002	0,004
0,009	0,008
0,022	0,009
0,057	0,012
0,148	0,017
0,402	0,021
0,807	0,030
1,310	0,037

Tabela 4: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Cr aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Cr Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,003	0,003
0,003	0,004
0,017	0,008
0,040	0,009
0,102	0,011
0,262	0,015
0,553	0,018
1,034	0,025
1,582	0,031

Tabela 5: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Mn aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Mn Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,122	0,001
0,276	0,002
0,421	0,002
0,556	0,001
0,663	0,003
1,614	0,004
2,336	0,002
3,287	0,004

Tabela 6: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Mn aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Mn Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,132	0,001
0,293	0,002
0,423	0,002
0,528	0,002
0,701	0,002
1,222	0,003
1,636	0,003
2,321	0,003
3,289	0,004

Tabela 7: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Ni aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Ni Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,108	0,002
0,241	0,003
0,423	0,003
0,597	0,003
0,737	0,003
1,113	0,003
1,477	0,002
1,833	0,002

Tabela 8: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Ni aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Ni Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,121	0,002
0,247	0,003
0,440	0,003
0,606	0,003
0,761	0,002
1,145	0,002
1,494	0,002

Tabela 9: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Pb aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Pb Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,012	0,002
0,079	0,004
0,173	0,005
0,281	0,007
0,400	0,006
0,612	0,013
1,268	0,010
2,096	0,018
2,757	0,019

Tabela 10: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Pb aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Pb Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,019	0,002
0,095	0,003
0,200	0,005
0,327	0,006
0,460	0,005
0,762	0,010
1,370	0,008
2,187	0,017
2,978	0,014

Tabela 11: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Zn aplicada ao solo argiloso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Zn Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,122	0,001
0,226	0,003
0,354	0,003
0,522	0,003
0,671	0,004
1,123	0,004
1,359	0,008
2,408	0,007
3,154	0,008

Tabela 12: Dados utilizados na estimativa da isoterma de Langmuir para a solução aquosa de Zn aplicada ao solo arenoso

Concentração de Equilíbrio (mmol L ⁻¹)	Zn Adsorvido (mmol g ⁻¹)
0,000	0,000
0,109	0,001
0,243	0,002
0,387	0,003
0,551	0,002
0,722	0,003
1,199	0,003
1,474	0,006
2,463	0,006
3,337	0,004