

VIII IMPACTO AMBIENTAL DO USO AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO

Wagner Bettiol

Otávio A. de Camargo

Introdução

Toda e qualquer atividade humana leva à produção de resíduos, sendo que a crescente demanda da sociedade pela manutenção e melhoria das condições ambientais tem exigido, das autoridades e das empresas públicas e privadas, atividades capazes de compatibilizar o desenvolvimento às limitações da exploração dos recursos naturais. Dentre os recursos, os hídricos, que até a geração passada eram considerados fartos, tornaram-se limitantes e comprometidos, em virtude da alta poluição em algumas regiões, necessitando, portanto, de rápida recuperação. Nessas condições, há que se tratar os esgotos urbanos, que são hoje os principais poluidores dos mananciais.

O tratamento dos esgotos, que com certeza irá reduzir a poluição dos rios e melhorar a saúde pública da população, resulta na produção de um lodo rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto, havendo necessidade de sua adequada deposição final. Entretanto, diversos projetos de tratamento de esgotos não contemplam o destino final do lodo produzido, e com isso se anulam parcialmente os benefícios da coleta e do tratamento dos efluentes. Assim, a comunidade precisa encarar com muita seriedade este problema, e, com auxílio de pesquisas científicas e tecnológicas, desenvolver alternativas seguras e factíveis para que esse resíduo não se transforme num novo problema ambiental, tirando-se, ao contrário, vantagens ambientais de sua deposição.

A deposição final adequada do lodo é uma etapa problemática no processo operacional de uma estação de tratamento de esgoto, pois seu planejamento tem sido negligenciado e apresenta um custo que pode alcançar até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento.

As alternativas mais usuais para o aproveitamento ou deposição final do lodo de esgoto são: deposição em aterro sanitário (aterro exclusivo e co-deposição com resíduos sólidos urbanos); reutilização industrial (produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica e produção de cimento); incineração (incineração exclusiva e co-incineração com resíduos sólidos urbanos); conversão em óleo combustível; recuperação de solos (recuperação de áreas degradadas e de mineração); "landfarming" e uso agrícola e florestal (aplicação direta no solo, compostagem, fertilizante e solo sintético). Entre as diversas alternativas existentes para a deposição final do lodo de esgoto, aquela para fins agrícola e florestal se apresenta como uma das mais econômicas, pois, como o lodo é rico em matéria orgânica e em macro e micronutrientes para as plantas, pode ser recomendada a sua aplicação como condicionador de solo e/ou fertilizante. Entretanto, o lodo de esgoto apresenta em sua composição diversos poluentes, tais como metais pesados, compostos orgânicos persistentes e organismos patogênicos ao homem, atributos que devem ser olhados com muito cuidado.

A deposição de esgotos na agricultura é uma prática antiga. As informações mais conhecidas são as originárias da China. No ocidente sabe-se que na Prússia a irrigação com efluentes de esgotos era praticada desde 1560. Na Inglaterra, por volta de 1800, foram desenvolvidos muitos projetos para a utilização agrícola dos efluentes de esgoto, especialmente em razão do combate à epidemia do cólera. A prática de uso do solo como meio de deposição do esgoto ou do lodo tem sido freqüente em muitos países.

No Brasil, não é difundida a experiência de incorporar resíduos de

esgoto, lodo e efluente aos solos, porque ainda são poucas as cidades dotadas de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE). O Ministério do Meio Ambiente estima que menos de 10% do esgoto urbano produzido são tratados antes de serem lançados nos rios. Os dados da Tabela 1 mostram a situação da coleta de esgoto e lixo no Brasil.

Apesar dessa situação, diversos municípios brasileiros estão coletando e tratando adequadamente os esgotos, e, por conseguinte, gerando lodo de esgoto. Algumas cidades – como Araraquara, Araras, Araçatuba, Campinas, Caraguatatuba, Franca, Itu, Jaú, Jundiá, Limeira, Matão, Monguaguá, Piracicaba, Presidente Prudente, Ribeirão Preto, São José dos Campos, Ubatuba e a Grande São Paulo, SP; Curitiba e Londrina, PR; Belo Horizonte e Uberlândia, MG; Brasília, DF; Recife, PE; Goiânia, GO; Vitória e Cachoeiro do Itapemirim, ES; Rio de Janeiro, RJ; e Campo Grande, MS, entre outras – estão tratando os esgotos e gerando lodo. Diversos desses municípios vêm trabalhando para descartar o lodo gerado na agricultura.

O volume de lodo gerado em muitos desses municípios é relativamente pequeno; eles se localizam em regiões agrícolas ou próximo delas, além de não apresentarem os problemas da intensa industrialização. Assim, de certa forma, a deposição do lodo de alguns desses municípios pode ser facilmente equacionada. A situação é bem mais complexa quando se considera a geração de lodo em regiões metropolitanas, como a de São Paulo. Desse modo, além do volume gerado, deve ser considerada a falta de espaço para aterro sanitário na região e também a distância das áreas agrícolas e florestais. Outro problema que deve ser ponderado é a intensa industrialização dessas regiões, que colabora com o aumento na concentração de metais pesados e compostos orgânicos persistentes no lodo de esgoto. Dessa forma, além da necessidade de um adequado monitoramento, há que se trabalhar no sentido de evitar o lançamento de esgotos industriais no sistema.

Tabela 1. Situação do saneamento básico no Brasil por faixa etária.

População	Sem esgoto	Sem água encanada	Sem coleta de lixo
0 a 15 anos	45%	23%	37%
> 60 anos	37%	18%	30%

Fonte: Fundação Getúlio Vargas (2000).

Características do lodo de esgoto

A composição do esgoto varia em função do local de origem (ou seja, se proveniente de uma área tipicamente residencial ou tipicamente industrial), da época do ano e de outros fatores. A Figura 1 apresenta a composição básica de esgoto doméstico, que deve ser tratado nas estações de tratamento.

Da mesma maneira, o lodo de esgoto apresenta uma composição muito variável, pois depende da origem do esgoto, bem como do processo de tratamento do esgoto e do seu caráter sazonal. Um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo e os demais nutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos. Na Tabela 2 podem-se observar as variações da composição de lodos de esgoto gerados em Estações de Tratamento de Esgoto.

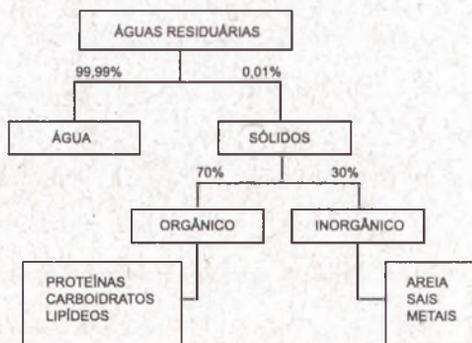


Figura 1. Composição do esgoto doméstico (Melo e Marques, 2000).

Tabela 2. Características químicas de três lotes dos lodos de esgotos das Estações de Tratamento de Esgoto de Franca (LF) e de Barueri (LB), localizadas no estado de São Paulo.

Atributo ¹	Primeiro lote (03/99)		Segundo lote (12/99)		Terceiro lote (09/00)		
	Unidade ²	LB	LF	LB	LF	LB	LF
Fósforo	g/kg	15,9	16,0	31,2	21,3	26,9	12,9
Potássio	g/kg	1,0	1,0	1,97	0,99	1,0	1,0
Sódio	g/kg	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,9
Arsênio	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cádmio	mg/kg	12,8	3,32	9,5	2,0	9,4	2,05
Chumbo	mg/kg	364,4	199,6	233	118	348,9	140,5
Cobre	mg/kg	1058	239,8	1046	359	953,0	240,9
Cromo total	mg/kg	823,8	633,8	1071	1325	1297,2	1230,3
Mercurio	mg/kg	<0,01	<0,01	<1	<1	<0,01	<0,01
Molibdênio	mg/kg	<0,01	<0,01	<1	<1	<0,01	<0,01
Níquel	mg/kg	518,4	54,7	483	74	605,8	72,4
Selênio	mg/kg	<0,01	<0,01	<1	<1	<0,01	<1
Zinco	mg/kg	2821	1230	3335	1590	3372	1198
Boro	mg/kg	36,2	40,7	11,2	7,1	29,3	19,7
Carbono orgânico	g/kg	248,2	305,1	271	374	292,9	382,4
pH		6,6	6,3	6,4	6,4	6,4	5,4
Umidade	%	66,4	83	80,2	82,4	71,2	82,7
Sólidos Voláteis	%	43,0	60,5			56,8	72,5
Nitrogênio total ³	g/kg	21	56,4	49,7	67,5	42,1	68,2
Enxofre	g/kg	13,4	16,3	10,8	13,3	17,1	15,7
Manganês	mg/kg	429,5	349,3	335	267	418,9	232,5
Ferro	mg/kg	54.181	33.793	32,5	31,7	37.990	24.176
Magnésio	g/kg	3,0	2,2	3,7	2,5	4,5	2,2
Alumínio	mg/kg	28.781	32.564	25,3	33,5	23.283	23.317
Cálcio	g/kg	40,3	29,2	22,8	16,8	47,8	24,8

¹Determinados de acordo com EPA SW-846-3051 (1986), no IAC (Campinas, SP).

²Os valores de concentração são dados com base na matéria seca.

³Os valores de concentração para o nitrogênio total e a umidade foram determinados em amostras em condições originais, na Embrapa Meio Ambiente. Bettiol (2004) e Fernandes *et al.* (2004).

Benefícios do uso agrícola do lodo de esgoto

A utilização do lodo de esgoto em solos agrícolas tem como principal benefício a incorporação dos macronutrientes – nitrogênio e fósforo – e dos micronutrientes – zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio. Como os lodos são pobres em potássio (cerca de 0,1%), há necessidade de se adicionar esse elemento ao solo. Pode-se dizer que, normalmente, o lodo de esgoto fornece ao solo as quantidades de nutrientes suficientes para as culturas. No entanto, é preciso conhecimento da sua composição, para se calcularem as quantidades adequadas a serem incorporadas sem se correr o risco de toxicidade às plantas e, em certas situações, aos animais e ao homem, atentando também para não se poluir o ambiente (CETESB, 1999).

Com respeito à melhoria das condições físicas do solo, o lodo de esgoto, de maneira semelhante à matéria orgânica, aumenta a retenção de umidade em solos arenosos e melhora a permeabilidade e infiltração nos solos argilosos, mantendo, por determinado tempo, uma boa estrutura e estabilidade dos agregados na superfície.

Embora em quantidade ainda insuficiente, várias pesquisas conduzidas no país mostram que o lodo é um resíduo com perspectivas favoráveis ao uso no solo para produção de plantas. Para a cultura do milho no cerrado brasileiro, Silva *et al.* (2000) demonstraram que o lodo de esgoto gerado pela CAESB, em Brasília, DF, apresenta potencial para substituição dos fertilizantes minerais. Melo & Marques (2000) apresentam informações sobre o fornecimento de nutrientes pelo lodo de esgoto para as seguintes culturas: cana-de-açúcar, milho, sorgo e azevém. Existem, ainda, informações do aproveitamento do lodo de esgoto para arroz, aveia, trigo, pastagens, feijão, soja, girassol, café e pêssego, entre outras culturas (BETTIOL; CAMARGO, 2000). Também em espécies florestais o lodo vem sendo utilizado com sucesso. Gonçalves *et al.* (2000) apresentam

informações sobre o potencial do uso do lodo de esgoto gerado na ETE de Barueri, SP, para o cultivo de *Eucalyptus*.

Considerações sobre os componentes potencialmente poluentes do lodo de esgoto

Apesar de todas as vantagens, o lodo de esgoto pode apresentar em sua composição elementos tóxicos e agentes patogênicos ao homem. Dessa forma, há necessidade de se conhecerem os efeitos desses poluentes no solo quando utilizado na agricultura. Muitas questões ainda não foram respondidas pela pesquisa científica, devendo esse fator relativo ao seu uso na agricultura ser levado em consideração.

Uma questão fundamental é a que diz respeito à presença e concentração desses elementos potencialmente tóxicos. O lodo contém normalmente em concentrações maiores que o solo, mesmo aquele exclusivamente doméstico. Assim, a sua incorporação nos solos agrícolas deve ser adequadamente planejada e monitorada. Além do zinco, cobre, manganês, ferro, molibdênio e níquel, que são micronutrientes essenciais para as plantas mas que em altas concentrações podem causar sérios problemas, o cádmio e o chumbo podem também aparecer em quantidades consideráveis, especialmente se os lodos provêm de regiões industrializadas. Nesse caso, há que se controlar e monitorar a aplicação, porque em especial o zinco, o cobre e o níquel, se presentes em teores elevados, podem ser fitotóxicos; o cádmio, particularmente, pode ser altamente prejudicial para os animais que se alimentem dessas plantas. Por isso, em todos os países onde o lodo de esgoto é aplicado na agricultura existem normas estabelecendo, entre outras coisas, as concentrações máximas permitidas de metais pesados no lodo e o teor máximo acumulado no solo. A norma P4230 da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, do estado de São Paulo) estabelece

esses limites, que são apresentados na Tabela 3. Além desses limites, a norma também estabelece a taxa máxima de aplicação anual de metais em solos agrícolas tratados com lodo e a carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo. Como exemplo, na Tabela 2 são apresentados os dados de metais pesados obtidos de amostras de lodos originários das ETEs de Barueri, SP, que trata esgotos domésticos e industriais, e de Franca, SP, que trata esgoto essencialmente doméstico. As variações são devidas basicamente à origem do esgoto. Assim, de acordo com a norma P4230, da CETESB, o lodo da ETE de Barueri não poderia ser descartado na agricultura, pois os limites de Ni estão acima do permitido (Tabela 3).

Além de São Paulo, o estado do Paraná, por meio do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), estabelece critérios para a deposição agrícola do lodo de esgoto. Nesse estado as limitações são maiores do que no estado de São Paulo. Entretanto, a partir do final de 2003, o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) iniciou uma discussão para a regulamentação, no nível nacional, da deposição do lodo de esgoto na agricultura, sendo que a norma já passou por consulta pública e está sendo sancionada para entrar em vigor em 2006. Também o estado de São Paulo está realizando a revisão de sua norma.

Tabela 3. Concentrações limite de metais pesados no lodo de esgoto aceitáveis para uso agrícola (base seca) em mg/kg; taxa de aplicação anual máxima de metais em solos (kg/ha/365 dias); e carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo (kg/ha).

Metal pesado	Concentração máxima permitida no lodo	Taxa de aplicação anual máxima	Carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo
Arsênio	75	2,0	41
Cádmio	85	1,9	39
Cobre	4.300	75	1.500
Chumbo	840	15	300
Mercúrio	57	0,85	17
Molibdênio	75	-	-
Níquel	420	21	420
Selênio	100	5,0	100
Zinco	7.500	140	2.800

Fonte: CETESB (1999)

A mobilidade dos metais pesados depende muito da reação do solo, ou seja, se ele é mais ou menos ácido; de maneira geral, aconselha-se que o pH seja mantido acima de 5,5, para evitar que os metais pesados, potencialmente tóxicos, possam ser absorvidos pelas plantas ou fiquem disponíveis no ambiente em quantidades que apresentem risco. À medida que aumenta o tempo de contato do lodo com o solo, diminui o perigo de as plantas absorverem os metais pesados em excesso, porque estes são fortemente retidos pelos colóides do solo, embora essa afirmativa nem sempre possa ser generalizada. Berton (2000) discute com detalhes os riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados.

O nitrogênio é um elemento essencial para o crescimento vegetal e para os seres vivos do solo. O uso adequado do lodo deve visar à eficiente utilização do nitrogênio, com um mínimo de perdas por percolação, volatilização, desnitrificação e arraste superficial. Com a decomposição do lodo adicionado ao solo, o nitrogênio orgânico é convertido em amônio ou nitrato. Os colóides do solo podem reter o amônio, mas o nitrato normalmente será lixiviado para fora da zona radicular, porque a capacidade dos solos em retê-lo é baixa. Por outro lado, em condições redutoras, pode ocorrer a desnitrificação, processo pelo qual o nitrogênio do nitrato é transformado em nitrogênio gasoso. Outra questão básica é o balanço do nitrogênio. A matéria orgânica do lodo aplicado ao solo sofre uma mineralização, liberando nitrogênio na forma amoniacal e nítrico, que não são somados aos existentes antes da aplicação. Assim, a quantidade de lodo aplicada deve ser tal que a quantidade de nitrato ou amônio presente não exceda àquela que a planta vai consumir, pois o excesso ficaria em forma lixiviável que poderia alcançar e contaminar corpos de água subterrâneos. Talvez esse elemento seja um dos mais importantes para monitoramento nas

áreas onde o lodo de esgoto é utilizado, na medida em que poderá contaminar o lençol freático (Dyenia *et al.*, 2006).

É praticamente nulo o risco que o excesso de fósforo possa apresentar para as plantas, porque dificilmente é constatada toxicidade por causa deste elemento e, por outro lado, os nossos solos, além de deficientes em fósforo, o retêm com grande energia. Assim, a contaminação das águas subterrâneas por esse elemento é muito difícil. Entretanto, há que se ter precaução, pois o arraste do material sólido superficial por erosão levará consigo fósforo retido, que, em certas situações, poderá ser liberado nos corpos de água superficiais para onde o material escorreu, provocando, muitas vezes, intensa eutroficação.

A decomposição do lodo de esgoto pode provocar a elevação da condutividade elétrica da solução do solo acima dos níveis aceitáveis para as plantas, em especial em regiões de baixa pluviosidade. Nas regiões de alta pluviosidade, os perigos são momentâneos, apenas enquanto as chuvas não arrastarem os sais para fora da zona radicular. Dentre os sais provenientes da decomposição do lodo, os de sódio podem causar problemas, pois este elemento pode substituir o cálcio e o magnésio do complexo de troca, dispersando a argila, destruindo os agregados e a estrutura dos solos e reduzindo a permeabilidade e a infiltração da água.

Os lodos de esgoto contêm patógenos humanos como coliformes fecais, salmonela, vírus e helmintos, que são passíveis de ser reduzidos com tratamentos adequados. Entretanto, é muito importante o monitoramento da população desses organismos, tanto no lodo a ser utilizado na agricultura como no solo onde ele foi aplicado. Soccol & Paulino (2000) discutem amplamente os riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos pelo uso do lodo de esgoto. A norma P4230, da CETESB, que estabelece os

critérios de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas, classifica o lodo de esgoto, quanto à presença de patógenos, em classes A e B. O lodo classe A é aquele que atende aos seguintes critérios: densidade de coliformes fecais inferior a 103 NMP/g de sólidos totais e densidade inferior a 3 NMP/4 g de sólidos totais de *Salmonella* sp. O lodo é considerado classe B quando a densidade de coliformes fecais for inferior a 2×10^6 NMP/g de sólidos totais. No caso do estado do Paraná, a norma do IAP estabelece limites para ovos de helmintos ($>1/g$) que são mais resistentes e de grande importância para a saúde pública brasileira. Esse procedimento é premente para as condições nacionais, pois a nossa população apresenta sérios problemas com relação a esses patógenos.

Outro grupo de contaminantes que merece atenção é o dos compostos orgânicos persistentes. Até o momento, no Brasil, nenhuma norma estabelece limites para esses compostos. Além disso, são extremamente escassos os trabalhos com esses contaminantes no Brasil, existindo praticamente apenas uma análise apresentada por Tsutiya (2001).

Impactos ambientais: um estudo de caso

Um experimento para estudar o impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto foi conduzido no Campo Experimental da Embrapa Meio Ambiente, localizado em Jaguariúna (SP), latitude $22^{\circ}41'$ sul, longitude 47° W. Gr. e altitude de 570 m., em Latossolo Vermelho Distroférrico (textura argilosa), cujas características físicas e químicas na camada de 0-20 cm, antes do início do estudo, foram as seguintes: pH em água = 5,8; MO% = 2,55; P = 3,5 mg/dm³; K = 1,51; Ca = 27,5; Mg = 8,5; Al = 1; H = 35; CTC = 73,5 mmolc/dm³; V% = 50,8; e argila = 450 g/kg.

Os lodos de esgotos foram obtidos nas Estações de Tratamento de Esgoto de Barueri, SP, que trata esgotos domésticos e industriais (Lodo de Barueri – LB), e de Franca, SP, que trata esgoto essencialmente doméstico (Lodo de Franca – LF). As principais características desses lodos são apresentadas na Tabela 2 e foram determinadas de acordo com EPA SW-846-3051 (EPA, 1986).

Os tratamentos estudados para cada lodo foram: testemunha absoluta; fertilização mineral (NPK) recomendada para a cultura (Raij *et al.*, 1996); lodo de esgoto com base na concentração de nitrogênio para fornecer a mesma quantidade de N da fertilização mineral (1N); e duas (2N), quatro (4N) e oito (8N) vezes a dose de lodo de esgoto recomendada. Os cálculos das doses de lodo foram realizados em função do nitrogênio disponível para as plantas, considerando como sendo 30% a taxa de mineralização do nitrogênio (CETESB, 1999). Para os tratamentos com LE, quando necessária foi realizada complementação com potássio. A necessidade de complementação com potássio foi dependente do teor de potássio no lodo e da quantidade total aplicada em cada tratamento. Os lodos foram distribuídos a lanço, na área total das parcelas experimentais, e incorporados a 20 cm de profundidade com auxílio de enxada rotativa, três a quatro dias antes da semeadura.

O estudo foi conduzido durante quatro anos, sendo que no primeiro foi cultivado o milho variedade CATI AL 30, com semeadura realizada em 05/04/1999; no segundo foi cultivado o híbrido AG1043, com semeadura em 13/12/1999; no terceiro e quarto o híbrido Savana 133S, com semeadura em 30/10/2000 e 05/11/2001, respectivamente. Um mês antes da aplicação do lodo para o terceiro cultivo foi realizada uma correção do pH, em cada parcela individualmente, para pH 5,7 – tendo como base uma curva de neutralização do solo. Para os três cultivos, os tratamentos culturais foram os padrões utilizados na cultura,

sem irrigação. Antes da aplicação de lodo foram retirados os restos culturais das parcelas.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com três repetições. Cada parcela apresentava dimensão de 10 x 20m, com 12 linhas cada. As parcelas foram separadas por bordaduras de pelo menos 5 m de cada lado, com *Bracchiaria* mantida roçada.

A seguir serão apresentados alguns resumos de trabalhos publicados ou encaminhados para publicação obtidos no experimento:

1. BETTIOL, W. Effect of sewage sludge on the incidence of corn stalk rot caused by *Fusarium*. **Summa Phytopathologica**, v.30, p.16-22, 2004. A deposição final na agricultura do lodo de esgoto gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é uma técnica em expansão, pois o lodo é rico em macro e micronutrientes e matéria orgânica. Num ensaio casualizado em blocos, com três repetições, em parcelas de 200 m², em um latossolo vermelho distroférico de textura argilosa, foi estudado o efeito da incorporação dos lodos de esgotos originários das ETES de Franca e de Barueri, SP, na incidência da podridão do colmo do milho causada por *Fusarium*. Os lodos foram incorporados ao solo nas concentrações de 0, 1, 2, 4 e 8 vezes a dose recomendada com base no teor de nitrogênio, em três cultivos sucessivos de milho: safrinha 1999 ('CATI AL 30') e safras de 1999/2000 ('AG1043') e 2000/2001 ('Savana 133S'). As doses de lodo foram comparadas com a adubação mineral recomendada para a cultura do milho. Nesse trabalho são apresentados os dados obtidos no segundo e no terceiro ciclo de aplicação do lodo, pois no primeiro não ocorreu a doença. Para as safras 1999/2000 e 2000/2001, as análises de regressão mostraram que a porcentagem de plantas doentes foi positivamente correlacionada com a concentração dos lodos incorporados ao solo. Os coeficientes de determinação para

o segundo cultivo do milho foram de $R^2=0,90$ e $R^2=0,84$, enquanto que para o terceiro cultivo foram de $R^2=0,77$ e $R^2=0,45$, para os lodos de Franca e de Barueri, respectivamente. As concentrações de lodo também apresentaram correlação positiva com a população de *Fusarium* do solo e com a condutividade elétrica (CE); por outro lado, foram negativamente correlacionadas com o pH. As correlações entre a porcentagem de plantas doentes e os atributos químicos do solo foram significativas e positivas, para os dois lodos, no nível de 5% para o teor de fósforo, a CTC, N_{total} , $N_{nitrato}$ e CE; por outro lado, foi negativamente correlacionado com o pH. Para o segundo cultivo, a porcentagem de plantas doentes apresentou correlação positiva com todos os micronutrientes (Fe, B, Cu e Zn), exceto com o Mn. Os resultados evidenciam que, para a utilização segura do lodo de esgoto na agricultura, há necessidade de estudos interdisciplinares a longo prazo e nas condições ecológicas de cultivo.

2. FERNANDES, S.A.P.; BETTIOL, W.; CERRI, C.C.; CAMARGO, P. Sewage sludge effects on gas fluxes at the soil-atmosphere interface, on soil $\delta^{13}C$ and on total soil carbon and nitrogen. *Geoderma*, v.125, p. 49-57, 2005. O objetivo do presente trabalho foi estudar o efeito da aplicação a longo prazo e continuada de lodo de esgoto no carbono e nitrogênio total, $\delta^{13}C$ do solo e os fluxos de gases na interface solo-atmosfera sob condições de campo e em condições tropicais. Assim, num latossolo vermelho distroférico foram realizadas quatro aplicações de lodo de esgoto originário da ETE de Barueri, que trata esgoto de uma região industrializada. O lodo foi incorporado nas concentrações de 0, 1, 2, 4 e 8 vezes a dose recomendada para a cultura, considerando o teor de nitrogênio da fertilização mineral, em quatro safras sucessivas. Todas as doses de lodo aumentaram a concentração de C e N no solo, quando

comparadas à testemunha. Os teores de C no solo, na maior dose de lodo de esgoto, aumentaram 55% e 48% nas camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, quando comparados à testemunha. No caso do N do solo o aumento foi de 59% e 66% na maior dose de lodo nas camadas 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, em relação à testemunha. O aumento no teor C no solo foi originário do lodo de esgoto, conforme demonstraram as análises de $\delta^{13}\text{C}$, e, como os teores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo ficaram negativos, sugere-se que o solo está seqüestrando carbono originário do lodo de esgoto. A aplicação de lodo de esgoto aumentou o fluxo de CO_2 , N_2O e CH_4 para a atmosfera, de 220, 320 e 165% para a maior dose de lodo de esgoto, quando comparado à testemunha. Apesar de estar havendo maior emissão de gases, quando comparado com os tratamentos testemunha e de adubação mineral recomendados para a cultura, é importante observar que parte do C adicionado, via lodo de esgoto, está sendo seqüestrado pelo solo.

3. FERNANDES, S.A.P.; BETTIOL, W.; CERRI, C.C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p.65-77, 2005. O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação em longo prazo e continuada de doses de lodo de esgoto na biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico e atividade enzimática de um latossolo vermelho distroférrico sob condições de campo em condições tropicais. Os estudos foram iniciados em 1999 e foram feitas quatro aplicações de lodo de esgoto produzido na Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri, SP. Os tratamentos estudados foram: testemunha; fertilização mineral (NPK), dose de lodo de esgoto para fornecer a quantidade de N recomendada para a cultura; e duas, quatro e oito vezes a dose recomendada. Os resultados mostraram que a respiração basal e a biomassa microbiana

C e N do solo aumentaram com a adição de lodo de esgoto, ou seja, até com a maior dose de lodo não ocorreu efeito inibitório. Entretanto, o valor do quociente metabólico aumentou com o aumento das doses de lodo de esgoto, refletindo possivelmente num solo mais perturbado. As atividades de urease e amilase do solo aumentaram com as doses de lodo e correlacionaram-se significativamente com a biomassa microbiana do solo. Considerando que o uso agrícola do lodo de esgoto é uma das melhores formas de sua deposição e considerando os resultados obtidos no trabalho, recomendamos que a quantidade de lodo a ser aplicada leve em conta as necessidades de N da cultura, e, ainda, que sejam evitadas aplicações sucessivas.

4. DYNIA, J.F.; SOUZA, M.D.; BOEIRA, R.C. Lixiviação de nitrato em latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. **Pesq. agropec. bras.** Brasília, v.41, n.5, p.855-862, 2006. Avaliou-se a lixiviação de nitrato em um latossolo vermelho distroférrico do campo experimental da Embrapa Meio Ambiente, causada pelas aplicações de lodo de esgoto e de fertilizante mineral em cinco cultivos de milho, conduzidas entre 1999 e 2003. As doses de N aplicadas via fertilizante mineral (FM) nos cinco cultivos foram de 50, 90, 100, 90 e 100 kg ha⁻¹. Nos tratamentos com os lodos (L0N, L1N, L2N, L4N e L8N), as doses de N disponível aplicadas a cada cultivo foram equivalentes a zero, uma, duas, quatro e oito vezes as do tratamento com fertilização mineral. Todos os tratamentos causaram lixiviação de nitrato, mas com diferentes graus de intensidade. A lixiviação aumentou com o aumento das doses e do número de aplicações dos lodos. Os teores médios de nitrato no perfil do solo nos tratamentos 0N, 1N, 2N e FM dos dois lodos foram estatisticamente iguais ($p < 0,05$) (exceto no quinto cultivo, em que o tratamento 2N de um dos lodos se destacou dos demais), sendo inferiores aos dos tratamentos 4N e 8N. Em relação ao tratamento FM,

as perdas médias de N-NO_3^- para a camada de solo entre 0,6 e 3,0m de profundidade nos tratamentos L1N, L2N, L4N e L8N, após cinco aplicações dos lodos, foram estimadas em 430, 1020, 2400 e 3970 kg ha⁻¹, respectivamente, correspondendo a cerca de 28%, 42%, 54% e 45% do N total aplicado. No período mais chuvoso do quarto cultivo de milho – após a quarta aplicação dos tratamentos –, as concentrações de N-NO_3^- na solução do solo a um metro de profundidade, nas parcelas dos tratamentos FM e L1N, ficaram entre 5 e 9 e 33 e 71 mg L⁻¹, respectivamente. No período o fluxo de água no solo apresentava sentido descendente, evidenciando a ocorrência de lixiviação de nitrato em taxas mais elevadas no tratamento L1N, devido às maiores concentrações do ânion na solução.

5. VIEIRA, R.F.; CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 867-874, 2003. O conhecimento da dinâmica da mineralização de materiais orgânicos adicionados ao solo é importante para prever os efeitos das possíveis perdas de N para o ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variação do N mineral, no período da seca e das águas, em solo cultivado com milho, após incorporação de doses crescentes de lodo de esgoto. Os tratamentos constituíram-se de parcelas não fertilizadas, parcelas com adubação nitrogenada, parcelas com dose de lodo de esgoto calculada para fornecer à cultura o mesmo teor de N do tratamento com adubação nitrogenada (1N) e parcelas com duas, quatro e oito vezes a dose de lodo de esgoto do tratamento 1N. As quantidades de lodo de esgoto a serem aplicadas ao solo devem ser diferentes no período da seca e no das águas, mesmo quando se baseiam nas necessidades de N, em decorrência das perdas desse elemento em períodos de intensas precipitações.

6. BOEIRA, R.C.; LIGO, M.A.V.; DYNIA, J.F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p.1639-1647, 2002. A mineralização do N orgânico é um dos principais fatores que determinam as quantidades de lodos de esgoto (LE) a serem aplicadas em solos. O objetivo deste trabalho foi quantificar, em laboratório, o potencial de mineralização de N orgânico num latossolo vermelho distroférrico, tratado com dois LE anaeróbios, um de origem doméstica (Franca, SP) e outro de origem doméstica e industrial (Barueri, SP). Os LE foram aplicados ao solo em doses de 1,5, 3, 6 e 12 g kg⁻¹ (Franca) e 4, 8, 16 e 32 g kg⁻¹ (Barueri), e o tempo de incubação foi de 15 semanas. O acúmulo de N inorgânico no solo ao final da incubação foi proporcional às quantidades de N orgânico adicionadas. O potencial de mineralização estimado pelo modelo exponencial simples foi de 24 mg kg⁻¹ de N no solo sem lodo e variou entre 44 e 265 mg kg⁻¹ de N no solo tratado com os lodos. A fração de mineralização potencial do N orgânico dos lodos foi estimada em 31%. A mineralização foi mais lenta no solo tratado com as duas maiores doses do LE de Barueri. Os dois lodos acidificaram o solo; o de Franca causou acidificação mais intensa que o de Barueri.

7. SILVA, C.A.; RANGEL, O.J.P.; BETTIOL, W.; MANZATTO, C.V. Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em latossolo sucessivamente tratado com lodos de esgotos (submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo). Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de doses de lodo de esgoto sobre os teores de metais pesados em solo e a disponibilidade desses elementos químicos para o milho. Foram conduzidos três experimentos, durante os anos agrícolas de 1999/2000 e 2000/2001, no Campo Experimental da Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna (SP). Em três cultivos de milho, as doses aplicadas dos lodos de esgoto oriundos de Barueri

(LB) e de Franca (LF) variaram de 0 a 139 Mg ha⁻¹. Foram avaliados os teores disponíveis (Mehlich-1 e DTPA) de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em solo e a fitodisponibilidade desses metais, por meio da correlação dos teores em solo com os em folhas e grãos de milho. O uso de doses crescentes de lodo de esgoto de Barueri resultou em um acréscimo nos teores disponíveis de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn pelo DTPA. As duas soluções extratoras testadas são eficientes em prever a fitodisponibilidade de Zn para folhas e grãos de milho. O grau de associação do teor de metal-solo com o absorvido pelo milho depende da solução extratora usada, da fonte de lodo de esgoto, do elemento químico avaliado e da seqüência de cultivo.

8. RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A.; BETTIOL, W. Efeito de aplicações sucessivas de lodo de esgoto sobre o acúmulo de metais pesados em milho (submetido à Revista Brasileira de Ciência do Solo). Avaliaram-se os efeitos de doses de lodo de esgoto sobre os teores de metais pesados em milho cultivado em latossolo do Campo Experimental da Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna (SP), nos anos agrícolas de 1999/2000 e 2000/2001. As doses de lodo (Lodos da ETE-Barueri, LB e da ETE-Franca, LF) aplicadas variaram de 0 a 139 Mg ha⁻¹ (Base seca). Foram avaliados os teores totais (digestão nítrico-perclórica) de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em folhas e grãos de milho, em três cultivos sucessivos. Verificou-se uma tendência de aumento nos teores de Cu, Mn e Zn em folha, e de Mn, Ni e Zn em grãos de milho com a aplicação sucessiva de lodo de esgoto. Essa elevação nos teores de metais pesados em folhas e grãos de milho ainda não foi suficiente para atingir os níveis considerados fitotóxicos para o milho, tampouco para inviabilizar o uso de grãos para o consumo humano. Entretanto, precisa-se considerar que foram realizados estudos por três anos agrícolas.

9. MUNHOZ, R.O.; BERTON, R.S. **Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto.** Dissertação (Mestrado) - Instituto Agronômico, Campinas, SP, 2001. Amostras superficiais do solo que recebeu 0, 63, 125, 250, 500 e 1000 kg/ha de P na forma de lodo de esgoto e 35 kg/ha de P na forma de fertilizante mineral solúvel foram coletadas após dois ciclos consecutivos da cultura. O fósforo extraído por Mehlich 1, Mehlich 3 e resina trocadora de íons (RTI) foi correlacionado com a concentração do elemento nas folhas de milho. O índice de eficiência do lodo foi obtido a partir da dose de fósforo na forma de lodo necessária para acumular nas folhas de milho a mesma concentração de P obtida no tratamento que recebeu a fonte de P solúvel. Os parâmetros capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAF) e energia de ligação foram estimados em conformidade com o modelo de Langmuir. As frações do P foram determinadas pela extração seqüencial do elemento com CaCl_2 , NaHCO_3 , NaOH , HCl e residual. Sendo que CaCl_2 e NaHCO_3 representam o P disponível; NaOH , o P moderadamente lábil; HCl , o P ligado ao cálcio; e a fração residual representa as formas resistentes de P. A principal consequência da adição do lodo sobre a dinâmica do fósforo no solo foi o aumento da disponibilidade do elemento. A eficiência do fósforo do lodo, sem distinguir a origem, foi de 34%. No entanto, separando os materiais, o fósforo do lodo de Franca apresentou eficiência de 64%, contra 16% do lodo de Barueri. Os três extratores apresentaram uma relação linear e significativa com o P acumulado nas folhas, porém em ordem decrescente de coeficientes de correlação. O lodo de esgoto diminuiu a energia de ligação e a capacidade de adsorção de P do solo, sem, contudo, modificar a CMAF. A maior disponibilidade de P nos solos que receberam os lodos de esgoto também foi constatada pelo aumento de 11,2% da participação do elemento nas frações mais lábeis e de 20,3% na fração moderadamente lábil em detrimento da fração

residual, que diminuiu em 32%. O lodo aumentou a disponibilidade de fósforo para o milho. No entanto, em doses elevadas de lodo diminuiu a energia de ligação do fósforo aos sítios de adsorção no solo. Isso aumenta os riscos de contaminação do ambiente nos casos em que há perda de solo. O fósforo adsorvido fracamente no material particulado das enxurradas seguiria em direção às águas superficiais.

10. MACEDO, J.R.; REICHARDT, K.; DORNELAS DE SOUZA, M. **Selamento superficial e atributos físicos e hídricos em solo tratado com lodo de esgoto**. Tese (Doutorado) – CENA/USP, Piracicaba, 2002. Na área experimental descrita anteriormente, os resultados obtidos com as propriedades físicas do solo permitiram as seguintes considerações: o sistema de manejo utilizado para preparo e incorporação do lodo de esgoto favoreceu a ação da chuva na formação do selamento superficial e afetou os outros atributos físicos e hidrológicos do solo, como a condutividade hidráulica do solo saturado e a curva de retenção de água. A adição de lodo de esgoto aumentou o aparecimento de rachaduras nos selamentos superficiais, propiciando o incremento da $K(\theta)$ por fluxo preferencial. Os métodos de transmissão de raios gama e de tomografia computadorizada foram eficientes no detalhamento do processo de selamento superficial. O lodo de esgoto proveniente de Franca vem apresentando comportamento diferenciado em relação ao lodo de Barueri, no que tange às propriedades físicas do solo. A análise de lâminas delgadas permitiu confirmar a presença de selamento superficial, com um aumento observado desde o tratamento testemunha absoluta até aquele com oito vezes a dose de lodo recomendada. A partir de uma determinada dose de lodo (entre 2 e 4 vezes a dose recomendada), está ocorrendo o sinergismo entre a degradação da estabilidade do solo e a ação cimentante da MO e/ou do polímero utilizado para desaguar o lodo.

11. SANTOS, I.; BETTIOL, W. Effect of sewage sludge on the rot and seedling damping-off of bean plants caused by *Sclerotium rolfsii*. **Crop Protection**, v. 22, p.1093-1097, 2003. Para a cultura do feijoeiro, em condições de campo, num solo latossolo vermelho distroférrico (textura argilosa), previamente infestado com 100g de arroz em casca contendo patógeno, foi estudado o efeito do lodo de esgoto nas concentrações de 12,4 Mg/ha, 24,8 Mg/ha, 37,2 Mg/ha e 49,6 Mg/ha sobre a severidade das doenças causadas por *Sclerotium rolfsii*; sobre a emergência, o estande e o peso de matéria seca de plantas; e sobre a condutividade elétrica, o pH e a atividade microbiana do solo. O lodo de esgoto reduziu a severidade das doenças causadas por *S. rolfsii* e aumentou a emergência e o estande final do feijoeiro em três cultivos de feijoeiro. A atividade microbiana, medida por meio da hidrólise de diacetato de fluoresceína e de desprendimento de CO₂, foi diretamente proporcional à concentração de lodo de esgoto, o mesmo ocorrendo para a condutividade elétrica. Para todos os cultivos a emergência e o estande final de plantas foram positivamente correlacionados com a atividade microbiana do solo e com a condutividade elétrica do solo. As concentrações de lodo estudadas não influenciaram a sobrevivência dos escleródios ao longo de 120 dias. Em relação ao desenvolvimento das plantas, devido às altas concentrações de lodo, foi observada fitotoxicidade nas condições controladas. Entretanto, em condições de campo e com doses até quatro vezes a recomendada para a cultura (49,6 Mg/ha), não foram verificados problemas no desenvolvimento das plantas.

Considerações finais

O lodo de esgoto, quando suas características estiverem dentro das normas estabelecidas, pode ser aplicado na agricultura.

Entretanto, há necessidade de se monitorarem os solos em relação ao nitrato, metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos humanos. Além desses potenciais contaminantes, há necessidade de se monitorarem as alterações físicas e biológicas que ocorrem no solo, bem como o equilíbrio nutricional.

A literatura internacional sobre o assunto é relativamente abundante, de maneira especial nos EUA e nos países da Europa Ocidental. A literatura nacional dispõe de algumas importantes contribuições, mas ainda aquém das necessidades para fornecer bases seguras à normatização, manejo, fiscalização e controle da aplicação dos lodos urbanos na agricultura. Dessa forma, é indispensável o envolvimento dos órgãos de pesquisa e ensino nos estudos sobre os efeitos do lodo de esgoto nos solos tropicais, bem como sobre os seus impactos no ambiente. Esses estudos devem ser executados preferencialmente em condições de campo e por equipes multidisciplinares. Os resultados obtidos nesses estudos devem ser considerados pelos órgãos ambientais que regulam a deposição de resíduos em solos.

Referências

BERTON, R. *Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados*. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.259-268.

BETTIOL, W. *Effect of sewage sludge on the incidence of corn stalk rot caused by Fusarium*. **Summa Phytopathologica**, v.30, nº 1, p. 16-22, 2004.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.

BOEIRA, R.C.; LIGO, M.A.V.; DYNIA, J.F. *Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, nº 11, p.1639-1647, 2002.

CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento**

biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999. 32p. (Manual Técnico – P4230).

Fernandes, S.A.P., Bettiol, W., Cerri, C.C., Camargo, P. Sewage sludge effects on gas fluxes at the soil-atmosphere interface, on soil $\delta^{13}\text{C}$ and on total soil carbon and nitrogen. **Geoderma**, v.125, p. 49-57, 2005.

GONÇALVES, J.L.M.; VAZ, L.M.S.; AMARAL, T.M.; POGGIANI, F. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: II. Efeito na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 179-196.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 109-141.

SILVA, J. E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. Alternativa agronômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 143-152.

SOCCOL, V.T.; PAULINO, R.C. Riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos pelo uso do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 245-259.

TSUTIYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, A.P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001. cap. 4, p. 89-131.

VIEIRA, R.F.; CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 867-874, 2003.