

Fórum de apresentação de resultados de pesquisas: **avanços e oportunidades**

23 de setembro de 2014

Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna/SP

RECICLAGEM DE LODOS DE ESGOTO EM SOLO AGRÍCOLA: BASES PARA REVISÃO DA LEGISLAÇÃO E RECOMENDAÇÕES DE USO

**Andrade, C. A. de¹; Pires, A. M. M.¹; Packer, A. P. C.¹; Filizola, H. F.¹; Lima, M. A. de¹;
Souza, M. D. de¹; Pazianotto, R. A. A.¹; Perez, D. V.²; Silva, W. T. L. da²; Milori, D. M. B.
P.³; Silva, W. T. L. da⁴; Coscione, A. R.⁴; Maria, I. C. de⁴; Chiba, M. K.⁴; Camargo, O. A.
de⁴; Borba, R. P.⁵; Carmo, J. B. do⁶; Grutmacher, P.⁷; Carvalho, C. S.⁷; Ribeirinho, V.
S.⁷; Souza, N. A. P. de⁷**

¹Embrapa Meio Ambiente; ²Embrapa Solos; ³Embrapa Instrumentação Agropecuária;

⁴Instituto Agrônômico(IAC); ⁵Unicamp; ⁶Universidade Federal de São Carlos;

⁷Pós-graduação do IAC.

Problema abordado

A possibilidade de escassez de água em futuro próximo tem preocupado a população mundial e gestores públicos de modo geral, não sendo diferente no Brasil, mesmo considerando que 12% da água doce do planeta estão localizados em território nacional (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2002). A distribuição desse recurso natural, entretanto, é contrastante no país, com 70% localizado na Região Norte, onde 7% da população vivem, e apenas 6% dos recursos hídricos na região Sudeste, que concentra 43% da população. A concentração de pessoas em regiões mais urbanizadas tem reflexos na geração de resíduos e no consequente desafio do descarte adequado no ambiente. A contaminação de coleções hídricas pelo descarte inadequado de esgoto é um reflexo deste cenário. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, do Ministério das Cidades, indicam que 57% da população brasileira ainda não têm acesso à coleta de esgoto e, do total coletado, apenas 35% é tratado (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO, 2010). Nos últimos anos, esforços têm sido concentrados para amenizar essa situação via aumento de investimento nas redes de abastecimento de água e de coleta de esgoto, resultando em aumento dessas redes. Mesmo com o aumento das redes de esgotamento sanitário, o problema ainda não está resolvido, pois no tratamento da água residuária gera-se um novo resíduo, o lodo de esgoto.

A quantidade de lodo produzido varia, principalmente, em função do tipo de sistema adotado na estação de tratamento de esgotos, mas é estimado que a cada 10.000 m³ de esgoto tratados são produzidas 15 t de lodo úmido.

Nas últimas décadas o principal destino do lodo de esgoto foi a disposição em aterros sanitários, mas essa situação deve mudar nos próximos anos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) proíbe o aterramento de resíduos orgânicos, tal qual lodos de esgotos sanitários, e determina que esse material seja reutilizado antes da disposição final no ambiente.

O uso agrícola do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas e matéria orgânica para o solo constitui promessa no Brasil desde a década de 80, com trabalhos atestando benefícios ao sistema agrícola, bem como investigando potenciais riscos ao ambiente, estes últimos principalmente associados a patógenos, metais pesados e lixiviação de nitrato. Pioneiramente em São Paulo, por meio da Norma Técnica P4.230 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1999), e depois nacionalmente com a Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2006) foram definidos critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto. Especificamente para o momento em que foi elaborada a Resolução nº 375 do CONAMA, estudos de longo prazo sob condições edafoclimáticas brasileiras eram insipientes para servirem como base única no estabelecimento de uma norma nacional. Dessa forma, ficou prevista revisão da referida norma após o prazo de sete anos de sua publicação. No ano de 2009, em evento para discussão e direcionamento de possíveis alterações e prioridades de pesquisa visando aprimoramento da resolução em sua revisão, alguns aspectos foram destacados (COSCIONE et al., 2010): (i) necessidade de dados em longo prazo; (ii) oportunidade de melhoria do documento em relação à dinâmica da matéria orgânica, destacando-se a disponibilização de nitrogênio, qualidade da matéria orgânica residual, efeito de aplicações sucessivas, disponibilidade de metais pesados; e (iii) novas vertentes a serem estudadas, como emissão de gases de efeito estufa.

Neste contexto, a presente pesquisa foi idealizada a partir de duas áreas experimentais com uso de lodo de esgoto por período superior a sete anos. As áreas são pertencentes ao Instituto Agrônomo (IAC) e à Embrapa Meio Ambiente.

Objetivo

Gerar informações para revisão da Resolução nº 375 do CONAMA quanto a aspectos relacionados aos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) nos solos, disponibilidade de N e cálculo da dose para aplicação, movimentação de nitrato e metais pesados no perfil do solo e emissão de gases do efeito estufa (GEE).

Principais contribuições

Solos agrícolas podem atuar como fonte ou dreno de CO₂ da atmosfera e o balanço de C no solo, no sentido de incremento do estoque de C, pode auxiliar na mitigação do efeito estufa. Sabe-se que o solo estoca 2,5 vezes mais C do que a atmosfera (JANZEN, 2004) e, portanto, alterações do C do solo tem importante impacto no C atmosférico.

Aplicações sucessivas de lodo de esgoto nas áreas experimentais incrementaram os estoques de C dos solos e esse efeito foi relacionado com a quantidade de C aportada, com o intervalo de tempo sem nova aplicação (variável entre 2 e 7 anos) e com o teor de argila do solo.

Os maiores incrementos em C foram verificados no solo (Latossolo Vermelho eutroférico) com teor de argila de 58%, em que houve acréscimo de 11 t ha^{-1} de C na camada 0 a 20 cm no tratamento com o uso de lodo para fornecimento de dose equivalente à adubação mineral adotada. Por meio de balanço de massas que considerou o aporte de C via lodo e o estoque de C na camada superficial, estimou-se que 58% do C aplicado foram estabilizados no solo na forma de compostos orgânicos humificados.

No Latossolo Vermelho distroférico, com 45% de argila, em que doses de lodo de esgoto até oito vezes recomendada para fornecer N ao milho foram aplicadas anualmente, por dez anos. A estabilização do C foi da ordem de 12% do total aplicado, valor inferior ao verificado para a área com solo mais argiloso.

A confirmação do balanço de massas foi realizada utilizando-se técnica isotópica que quantifica a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Por meio dessa técnica foram estimados que $54 \pm 7\%$ do C do solo é remanescente/proveniente do lodo de esgoto aplicado no solo com maior teor de argila, enquanto $22 \pm 5\%$ foi o valor atribuído ao lodo aplicado no solo menos argiloso.

A textura do solo controla, pelo menos em parte, sua capacidade em estocar C; e espera-se que a saturação em C seja maior quanto maior o teor de argila. Dessa forma, como os solos em questão apresentaram entre 23 e 24 g kg^{-1} de matéria orgânica na camada superficial 0 a 20 cm, maiores incrementos em C no solo com 58% de argila podem ser explicados pela provável maior capacidade em acumular/estabilizar a fração orgânica aplicada via lodo.

Concomitantemente ao sequestro de C no solo, aumentos entre 12 e 45% nos estoques de N também foram verificados. Tal fato adquire importância adicional quando se considera a recomendação da dose de lodo em função da demanda da cultura em N. Para definição da dose de lodo a ser aplicada no solo visando o fornecimento de N às plantas, conforme Resolução nº 375 do CONAMA, deve-se considerar: (i) a demanda de N pela cultura, cujo valor geralmente está bem estabelecido em função da produtividade esperada e de outros aspectos auxiliares; (ii) a quantidade de N nas formas amoniacal e nítrica presentes no lodo, facilmente determinadas em laboratório; e (iii) a taxa de mineralização do N orgânico (TMN) contido no lodo. A TMN pode ser determinada em condições controladas de laboratório, por meio de incubações, mas os procedimentos indicados (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1999; CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2006) geralmente são demorados (período de incubação superior a 100 dias) e de custo elevado. Por isso, os próprios documentos orientadores para reciclagem agrícola de lodos de esgoto trazem alguns valores de TMN conforme o sistema de tratamento dos esgotos. Deve-se ressaltar que tais valores podem ser adotados e utilizados de forma fixa ao longo de sucessivas aplicações do lodo numa mesma área.

No entanto, como há aumento no estoque de N em sistemas com uso de lodo de esgoto, seria plausível supor que ao longo do tempo e de sucessivas aplicações desse resíduo houvesse redução da dose para aplicação, de maneira a prevenir o excesso de formas inorgânicas passíveis de perdas. Além disso, possíveis alterações na TMN, devido a

aplicações anteriores de lodo, também deveriam ser consideradas na recomendação da dose para aplicação.

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, não foi verificada variação da TMN com o uso anterior do lodo, o que significa que o valor fixo de TMN é adequado na recomendação da dose; mas isso não significa que a adoção do valor indicado na Resolução nº 375 do CONAMA seja o mais adequado. De acordo com a resolução, 30% seria o valor de TMN a ser adotado em função do tipo de tratamento do esgoto na estação, porém o valor obtido em laboratório com incubação de 120 dias usando mistura do lodo com amostras do Latossolo Vermelho eutroférico foi igual a 12% (ANDRADE et al., 2013). Percebe-se, dessa forma, que a determinação da TMN em procedimento de laboratório deve ser preferida ao invés da adoção do valor conforme o sistema de tratamento do esgoto. Nesse sentido, testou-se um método rápido (7 dias) de incubação anaeróbia para estimativa da TMN (KEENEY, 1982), alternativamente ao método de incubação aeróbia, que conforme mencionado é demorado e de alto custo. Os resultados do método rápido foram satisfatoriamente correlacionados com a disponibilidade de N no campo, o que permite recomendar este procedimento para ampliar o acesso a esta informação e, consequentemente, aprimorar a definição da dose de lodo para aplicação.

Quanto a redução das doses de lodo com sucessivas aplicações desse resíduo numa mesma área, foi verificado que o efeito residual de aplicações anteriores é importante. Em termos práticos pode-se calcular a dose conforme indicado na Resolução nº 375 do CONAMA e subtrair o efeito residual, conforme descrito em Cogger e Sullivan (2007). Esses autores estimaram que 8% do N orgânico aplicado via lodo de esgoto mineralizam no segundo ano após a aplicação, 3% no terceiro ano e 1% no quarto e quinto anos. Depois de 5 anos a contribuição do lodo é desconsiderada.

O excesso de N no sistema edáfico, suplantando a capacidade de absorção pelas plantas, conduz a riscos ambientais principalmente associados a lixiviação de nitrato (NO_3^-) no perfil do solo e emissão de óxido nitroso (N_2O) para a atmosfera.

A movimentação do N na forma de NO_3^- no perfil do solo foi evidenciada por meio de resultados da concentração desta espécie química até 5 m de profundidade (SIQUEIRA et al., 2013). A maior concentração de NO_3^- na solução do solo foi verificada na profundidade de 5 m no monitoramento feito entre janeiro a abril de 2013. Nos anos de 2003 e 2007, Borba et al. (2007) verificaram que o deslocamento do NO_3^- alcançou 4 m de profundidade.

No caso de outro ânion, o sulfato (SO_4^{2-}), o acúmulo foi verificado entre 1 e 2 m de profundidade em 2013 (SIQUEIRA et al., 2013), mesmas profundidades em que Borba et al. (2007) verificaram as maiores concentrações dessa espécie química no período de 2003 e 2007. Isso indica que o deslocamento do SO_4^{2-} foi limitado aos primeiros 2 m de profundidade e isso deve ter ocorrido em função da reversão de cargas, com predomínio de cargas positivas abaixo de 2 m de profundidade, e da interação mais forte entre o sulfato e a superfície de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A dinâmica do SO_4^{2-} contrasta com verificado para o NO_3^- , em que se destaca o deslocamento mais rápido deste último no perfil do solo e o potencial para contaminar coleções hídricas subterrâneas.

A disponibilidade do N no solo também interfere na emissão de GEE, notadamente com relação ao N_2O que apresenta potencial de aquecimento global 298 vezes maior do que o

CO₂ (STOCKER et al., 2013) e cuja emissão por atividades agrícolas tem no uso de fertilizantes nitrogenados uma forte contribuição.

De acordo com as Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2006), 1% do N aplicado em solos agrícolas é emitido para a atmosfera na forma de N₂O, independentemente da fonte utilizada, se mineral ou orgânica. Esse valor de emissão de GEE em relação ao adicionado é denominado fator de emissão. Sabe-se, entretanto, que há alta variabilidade nas emissões de N₂O e fatores de emissão mais específicos para cada tipo de fertilizante e/ou condições edafoclimáticas são aspectos importantes no aprimoramento dos inventários de emissão, bem como na avaliação de práticas e processos no sentido de mitigação do aquecimento global.

Os fatores de emissão de N₂O encontrados não diferiram entre as áreas experimentais e foram, em média, 0,07% (de 120 kg ha⁻¹) para o N aplicado via fonte mineral e 1,65% (de 435 kg ha⁻¹) para o N aplicado via lodo de esgoto.

Apesar do fator de emissão do N aplicado via lodo ser relativamente alto, principalmente considerando-se a quantidade total de N aplicada, ou seja, 435 kg ha⁻¹, este valor não deve ser interpretado de modo exclusivo, pois há que se considerar o seqüestro de C no solo com o uso do lodo. No caso do fertilizante mineral não se pode negligenciar a demanda de energia no seu processo de obtenção, conhecido como Haber-Bosch, fundamentado no uso de combustíveis fósseis e alta pressão e temperatura para produzir amônia (SMIL, 2004).

Calculando-se a emissão de N₂O como equivalente de C-CO₂ emitido por unidade de C adicionado ao solo como lodo, chegou-se ao valor de 0,2, que significa que 20% do C passível de estabilização no solo foi neutralizado pelo N₂O emitido. Confrontando-se este valor com as quantidades de C estabilizadas no solo (incremento nos estoques) apresentadas anteriormente, isto é, 0,12 e 0,58 por unidade de C aplicada, respectivamente para os solos com 45% e 58% de argila, percebe-se que o balanço de C em sistemas com uso de lodo de esgoto pode ser variável e o papel em mitigar ou não o efeito estufa pode depender de outros fatores como aprimoramento da dose de N para aplicação via lodo (redução das doses no tempo) e relação teor de argila e saturação do solo em C.

Impactos sociais, econômicos e ambientais

O agronegócio brasileiro é responsável por cerca de 20% do produto interno bruto (PIB) nacional, porém a produtividade das culturas encontra-se alicerçada no uso de fertilizantes minerais, em sua maioria importados. Conforme dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos em seus relatórios anuais, o Brasil importa mais de 70% do total de fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura, enquanto esses valores são aproximadamente de 20% para fertilizantes fosfatados e superiores a 90% no caso do potássio.

A redução da dependência nacional quanto a importação de fertilizantes é estratégica para o país (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2011) e materiais alternativos para o fornecimento dos nutrientes devem ser continuamente

avaliados. Nesse sentido, a reutilização agrícola de lodos de esgoto como fonte de N para as culturas é passo importante, uma vez que a geração desse resíduo tende a ser difundida pelo país na medida em que os programas para coleta e tratamento dos esgotos sejam ampliados.

O aprimoramento no cálculo da dose de lodo, bem como a validação de teste rápido de laboratório para estimar a taxa de mineralização do N do lodo são fundamentais para o avanço da legislação nacional pertinente. Além disso, as alterações aqui propostas devem reduzir a dose de lodo para aplicação no campo, o que reflete em menor custo para transporte e aplicação do resíduo, bem como na possibilidade de se manejar áreas mais extensas com o mesmo volume de resíduo gerado.

Discute-se, entretanto, a possibilidade de estender a forma de cálculo da dose de lodo de esgoto para outros resíduos orgânicos, cujo uso na agricultura vem sendo realizado tradicionalmente de forma empírica. O desdobramento desta discussão deve ser uma nova pesquisa para validação do método e, dessa forma, ampliação da atuação da Embrapa e instituições parceiras no subsídio a políticas públicas.

Sob o ponto de vista ambiental, o ajuste da dose de lodo de forma a prevenir contra excesso de N no sistema reduz riscos associados a lixiviação de nitrato para águas subterrâneas e tem possível impacto na redução das emissões de gases do efeito estufa.

A determinação do fator de emissão de N_2O a partir do lodo aplicado no solo é outro ponto a ser destacado, dada a escassez de dados nesse sentido. Tais valores tornam-se importantes ao avaliar o desempenho ambiental de sistemas de produção, o que tem sido cada vez mais demandado no cenário de globalização de mercados.

A possibilidade de sequestrar carbono no solo tratado com lodo também faz parte do cenário global, em que alterações no manejo para incremento em carbono passam a fazer parte de políticas públicas, como é o caso do Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) do governo federal brasileiro, que prevê capacitação e incentivos financeiros aos produtores rurais que adotarem técnicas de agricultura sustentável com baixa emissão de carbono.

Referências:

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2002. 68 p.

ANDRADE, C. A.; SILVA, F. M. S.; PIRES, A. M. M.; COSCIONE, A. R. Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo após sucessivas aplicações de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 5, p. 536-544, 2013.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Informe setorial: panorama atual e perspectivas de desenvolvimento do setor de fertilizantes**. Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/setorial/informe-16AI.pdf>. Acesso em: 9 maio 2011.

BORBA, R. P.; CAMARGO, O. A.; BETTIOL, W.; COSCIONE, A. R.; KIRA, C. S.; SAKUMA, A.; COSTA, V. L. Lixiviação de nitrato e sulfato ao longo do perfil de um Latossolo Vermelho que recebeu lodo de esgoto para fins agrícolas. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31., 2007, Gramado, RS. **Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira**: livro de resumos. Gramado: UFRGS: SBCS, 2007. p. 275.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 ago. 2010. Seção 1, p. 3-7.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (SP). **Norma técnica**: aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. São Paulo: CETESB, 1999. 34 p. (P4.230 Ago/1999).

COGGER, C. G.; SULLIVAN, D. M. **Worksheet for calculating biosolids application rates in agriculture**. Washington State University Cooperative Extension, Pullman, WA, 2007. 14 p. (PNW0511e). Disponível em: <<http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/pnw0511e/pnw0511e.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.º 375, de 29 de agosto de 2006: 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. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Seção 1, p. 141-146.

COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A.M.M. **Uso agrícola de lodo de esgoto**: avaliação após a Resolução n. 375 do CONAMA. Botucatu: FEPAF, 2010. 407 p.

IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**: prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japão: IGES, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 9 set. 2014.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 104, p. 399-417, 2004.

KEENEY, D. R. Nitrogen-availability indices. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods of soil analysis**: part 2, chemical and microbiological properties. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1982. p. 711-733.

SIQUEIRA, V. L. F.; RIBEIRINHO, V. S.; CAMARGO, G. R.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Concentração de ânions no perfil de solo tratado sucessivamente com lodo de esgoto. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 7., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 2013. 1 CD ROM. n.13410. 8 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2008**. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=88>>. Acesso em: 30 mar. 2011.

SMIL, V. **Enriching the earth**: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world
Cambridge: MIT Press, 2004. 360 p.

STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.;
NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M.; (Ed.) **IPCC**: summary for policymakers:
climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the fifth
Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge:
Cambridge University Press, 2013.