

Aplicação de resíduos ao solo: a microbiologia pode ajudar no monitoramento?

Marco Antonio Nogueira⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pesquisador; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Londrina, PR; bolsista CNPq. marco.nogueira@embrapa.br.

RESUMO: As atividades humanas geram resíduos das mais variadas naturezas e estados físicos, com potencial de causar danos ao ambiente se não forem destinados adequadamente. Vários resíduos urbanos e agroindustriais, entretanto, apresentam potencial para aplicação ao solo como fonte de nutrientes e corretivos de acidez. Podem ser citados os casos de efluentes de esgotos tratados, lodo de esgoto, lixiviado de aterro sanitário, vinhaça, lodo de curtume, efluentes da criação de suínos, etc. Em que pese o risco de degradação ambiental com elementos-traço, excesso de sais, nitrogênio, pesticidas, microrganismos patogênicos, etc., a aplicação de resíduos ao solo pode ser vantajosa, mas requer embasamento técnico e monitoramento constante, de acordo com as normas/leis vigentes. Devido às importantes funções que desempenham, microrganismos e processos microbiológicos podem ser usados no monitoramento de eventuais efeitos negativos da adição de resíduos ao solo. O grande desafio é selecionar, interpretar e empregar os atributos mais adequados para o monitoramento. Essa revisão enfoca os resultados de alguns trabalhos sobre aplicação de resíduos ao solo e monitoramento por meio de atributos microbiológicos e bioquímicos. O atributo microbiológico que melhor reflete os efeitos da aplicação do resíduo é variável e depende da característica do resíduo como o teor de carbono orgânico, nutrientes, pH, presença de contaminantes, etc.

Termos de indexação: disposição controlada, fontes alternativas de nutrientes, ciclagem.

INTRODUÇÃO

Vários resíduos da atividade humana, como os urbanos, agrícolas ou agroindustriais apresentam carbono orgânico não estabilizado, alto conteúdo de nutrientes e/ou contaminantes, os quais podem causar graves danos ambientais, especialmente ao solo e à água, se não manejados e dispostos adequadamente. Dentre as alternativas de destinação, há grande potencial de uso como fonte de nutrientes em solos agrícolas ou na recuperação de solos degradados, melhorando sua fertilidade e o estado nutricional das plantas (Alcantara et al., 2007). Assim, além de ser mais barato do que os

tratamentos intensivos, a aplicação controlada de resíduos ao solo diminui o risco de contaminação da água devido à capacidade do solo, dentro de certos limites, de retenção e depuração de contaminantes. No entanto, a adequada aplicação de resíduos em solos agrícolas precisa seguir critérios técnico-científicos e receber monitoramento constante, uma vez que a disposição inadequada pode levar a valores inadequados de pH, excesso de sais, elementos-traço, agentes patogênicos, substâncias orgânicas tóxicas, lixiviação de nitrato, etc., comprometendo a sustentabilidade agrícola e ambiental e o potencial de uso do solo.

A comunidade microbiana do solo desempenha importante papel na sustentabilidade dos agroecossistemas, como a formação/mineralização da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, com implicações na fertilidade do solo e no estado nutricional das plantas. Além disso, a diversidade microbiana contribui para o aumento da qualidade do solo, mantendo as populações em equilíbrio, com consequente aumento da homeostase e resiliência, de modo a evitar a dominância de grupos específicos de microrganismos, notadamente patógenos, e assegurar a manutenção das funções do solo intermediadas por processos biológicos. Por sua vez, as comunidades microbianas e seus processos são dinâmicos e respondem quantitativa e qualitativamente a alterações impostas ao ambiente e por isso podem ser empregados no monitoramento do uso do solo como receptor final de resíduos.

O objetivo dessa apresentação é focar em atributos microbiológicos do solo relacionados à ciclagem de C e nutrientes como ferramenta para monitoramento de áreas que receberam resíduos urbanos e agroindustriais.

COMPONENTES DOS RESÍDUOS

Alguns resíduos apresentam, além do C não estabilizado biologicamente, representado pela alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), vários outros constituintes inorgânicos que são nutrientes de plantas. Entretanto, há também constituintes com potencial para causar danos ambientais, seja à água, seja ao solo e à atmosfera. Por exemplo, os biossólidos provenientes de estações de tratamento de esgoto têm potencial corretivo de acidez, além de



apresentar teores consideráveis de N (predominantemente na forma orgânica), P e Ca^{2+} , mas podem conter elementos-traço, contaminantes orgânicos e patógenos. Os lodos de curtume também apresentam elevados teores de N predominantemente orgânico, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , além de potencial corretivo de acidez, mas podem conter elementos-traço, sobretudo o cromo. Os efluentes de criações de suínos são ricos em N, também predominantemente orgânico, além de P e micronutrientes metálicos como o Cu^{2+} e o Zn^{2+} , cujo excesso é prejudicial, além da possibilidade de contaminantes biológicos. Já os efluentes de esgoto tratado e os lixiviados de aterro sanitário apresentam baixos teores de C não estabilizado biologicamente, mas são ricos em N, predominantemente na forma amoniacal, além de quantidades expressivas de Na^+ e K^+ , os quais podem levar a problemas de dispersão de argilas, e também Cl^- e outros íons que contribuem para o aumento da salinidade do solo. O N é o nutriente comum a todos os resíduos listados, podendo estar predominantemente na forma orgânica ou mineral, dependendo do resíduo. Pode assumir diferentes níveis de oxirredução intermediados por microrganismos, o que altera sua dinâmica no solo, podendo levar à lixiviação de nitrato, volatilização de amônia e desnitrificação. Além disso, o Na^+ geralmente é encontrado em concentrações elevadas na maioria dos resíduos, o que também leva a preocupações quanto à física e a salinidade do solo. É preciso considerar ainda a ocorrência de elementos-traço potencialmente tóxicos, além de contaminantes orgânicos, como pesticidas, antibióticos, hormônios, etc. Em todos os casos existe o risco da presença de contaminantes biológicos, como patógenos, devido à sua origem.

MICRORGANISMOS E PROCESSOS MICROBIOLÓGICOS NO MONITORAMENTO DE ÁREAS QUE RECEBERAM RESÍDUOS

A biomassa e atividade microbiana podem fornecer informações sobre efeitos da adição de resíduos contaminados com substâncias potencialmente tóxicas ou prejudiciais. Assim, efeitos estimulantes ou inibitórios podem ser observados, o que ajuda a monitorar os efeitos sobre importantes processos desempenhados pela microbiota do solo, com o objetivo de prevenir a sua degradação.

Atributos relativos ao nitrogênio

O N é o principal nutriente presente nos resíduos com potencial para aplicação ao solo. Pode estar na forma predominantemente orgânica, como em

biossólidos, ou predominantemente na forma mineral, como nos lixiviados de aterro. Estando na forma orgânica dependerá da ação microbiana para que seja mineralizado e disponibilizado. Condições adversas às transformações do N podem comprometer sua ciclagem no solo e por isso a avaliação de atributos microbiológicos envolvidos nesse processo é importante no monitoramento de áreas que receberam resíduos. Por exemplo, a taxa de amonificação indica a capacidade do solo em converter formas orgânicas a N-mineral e é intermediada por microrganismos amonificadores. A comunidade de amonificadores pode ser estimada por técnicas simples como o número mais provável (NMP) em meios de cultura específicos, mas existe a limitação de parte da comunidade microbiana não ser cultivável. Pode-se ainda estimar a taxa de amonificação pela verificação da conversão de N-orgânico a N-amoniacal durante um período de incubação. Nesse caso, a vantagem é que o método não depende de cultivo. A avaliação de enzimas relacionadas à mineralização do N também se mostra bastante promissora, como é o caso da avaliação das atividades da asparaginase e glutaminase.

A taxa de nitrificação é também outro processo de grande importância para o monitoramento de solos que recebem resíduos ricos em N. Assim como para os amonificadores, a comunidade de microrganismos oxidantes de amônio pode ser estimada por NMP, ou ainda ter a diversidade estimada por técnicas moleculares, independentes de cultivo, como por meio da amplificação do gene *amoA*, que codifica unidades da enzima responsável pela primeira etapa da oxidação da amônia. A amonificação consiste na conversão do N-amoniacal a N-nitrito e na sequência a N-nitrato. É um processo rápido que aumenta os riscos de perdas de N por lixiviação do nitrato e perdas por desnitrificação, embora a taxa de nitrificação possa ser inibida pela amônia (Santos et al., 2013). Geralmente a rápida nitrificação é acompanhada por lixiviação de nitrato em solos que receberam resíduos contendo N (Martines et al., 2010), especialmente se a aplicação é desconectada da demanda das plantas pelo nutriente (Santos et al., 2013). Em experimento em que se realizou aplicação de lixiviado de aterro sanitário ao solo, observou-se uma redução da taxa de nitrificação com o aumento das doses, supostamente devido à inibição pelo amônio, mas essa redução não foi limitante à conversão da maior parte do N-amoniacal em N-nitrato em menos de duas semanas após a aplicação do lixiviado (Santos et al. 2013).

A aplicação de biossólidos ao solo também aumenta as taxas de amonificação e nitrificação,

com consequente conversão a N-nitrato (Carmo, 2010), a qual aumenta com as doses aplicadas ao solo. Esse aumento é atribuído a duas razões: a primeira é relacionada ao aumento do pH do solo pela aplicação do biossólido tratado com cal, o que favorece os microrganismos nitrificadores. Outra possibilidade é o próprio resíduo trazer consigo uma comunidade de microrganismos nitrificadores, aumentando a ocorrência desse processo no solo.

Como consequência prática do inevitável processo de nitrificação, a aplicação de resíduos ricos em N ao solo, independentemente se o N é predominantemente amoniacal ou orgânico, deve ser feita em menores doses e com aplicações distribuídas ao longo do tempo, dentro das demandas das plantas presentes na área que recebe o resíduo, de modo a propiciar a imobilização do N e minimizar as perdas por lixiviação do nitrato.

Atributos relativos ao carbono

Resíduos contendo altos teores de C podem induzir a atividade microbiana do solo medida pela respiração basal, como aplicação de lodo de curtume (Nakatani et al., 2011) e biossólido (Carmo, 2010). Entretanto, a aplicação de lixiviado de aterro sanitário, que apresenta a maior parte do C recalcitrante, na forma de ácidos húmicos, não alterou a atividade microbiana (Santos et al., 2013). A respiração basal é um indicador da atividade microbiana momentânea do solo, a qual se estabiliza quando as formas de C lábil se exauram. Já a respiração induzida por substrato, geralmente um açúcar simples de fácil degradação, está relacionada à comunidade microbiana ativa e dá uma indicação sobre efeitos de substâncias tóxicas inibidoras trazidas com o resíduo.

Outra maneira de interpretar os efeitos da aplicação de resíduos à comunidade microbiana é o cálculo do coeficiente metabólico (qCO_2). Esse índice expressa a quantidade de C- CO_2 desprendido por unidade de biomassa microbiana num período de tempo determinado, e aumenta na proporção em que aumenta o estresse da comunidade microbiana. Anderson (2003) sugeriu que valores de qCO_2 acima de $2 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ BMC h}^{-1}$ é um indicativo de condições estressantes à comunidade microbiana devido a condições ambientais adversas. Entretanto, esse índice precisa ser interpretado com cuidado, principalmente se o solo recebeu resíduos contendo C não estabilizado biologicamente. Convém que a interpretação desse índice seja realizada concomitantemente com a atividade da desidrogenase, que também estima a atividade microbiana com base no fluxo de elétrons da cadeia respiratória, ou algum outro teste que permita a

avaliação da atividade metabólica como a hidrólise do diacetato de fluoresceína.

O perfil fisiológico da comunidade microbiana também pode ser avaliado com base na capacidade de uso de diferentes substratos de carbono pelo kit Biolog EcoPlate®. Essa técnica foi empregada para avaliação do efeito da aplicação de efluente de esgoto tratado (Paula et al., 2010) e também de lodo de curtume (Nakatani et al., 2012) ao solo, permitindo detectar mudanças metabólicas na comunidade microbiana em razão da aplicação desses resíduos. No caso da aplicação do lodo de curtume, houve aumento dos índices de diversidade e riqueza metabólica da comunidade microbiana.

Embora a biomassa microbiana de C seja empregada como indicador de efeitos de uso do solo, muitas vezes as respostas não são consistentes com a aplicação de resíduos (Nakatani et al., 2011; Panchoni, 2011). Entretanto, a biomassa microbiana de N, assim como a respiração basal, têm se mostrado mais sensíveis, permitindo maior distinção dos efeitos da aplicação de resíduos ao solo (Carmo, 2010).

Atividades enzimáticas

A atividade de algumas enzimas chave relacionadas ao metabolismo microbiano ou transformações de C e nutrientes também são importantes ferramentas no monitoramento de solos que receberam resíduos. Essas enzimas são responsivas não apenas a mudanças no metabolismo microbiano decorrentes da adição de formas lábeis de C e nutrientes ao solo, mas também em decorrência de efeitos adversos, como os causados por salinidade ou contaminantes potencialmente tóxicos.

A urease, por exemplo, é uma enzima considerada sensível à presença de elementos-traço no solo (Tejada et al., 2011). Entretanto, em trabalhos recentes considerando adição de resíduos contaminados com elementos-traço em três tipos de solo, não houve efeito sobre a atividade dessa enzima, enquanto que as atividades de desidrogenase e fosfatase ácida foram muito mais eficientes como indicadores da contaminação (Kishino, 2011). Em um Nitossolo Vermelho eutroférico que recebeu seis adições de doses de lixiviado de aterro sanitário ao longo de dois anos, a atividade da desidrogenase diminuiu com o aumento das doses, cuja maior dose foi equivalente a 120 kg ha^{-1} de N (Panchoni, 2011). Entretanto, essa diminuição também ocorreu no solo do tratamento que recebeu 120 kg ha^{-1} de N na forma de ureia. A atividade da urease, por sua vez, aumentou apenas no solo do tratamento que recebeu N na forma de ureia e não teve relação com as doses do lixiviado.



A atividade da fosfatase alcalina é de particular interesse em relação à fosfatase ácida no monitoramento de solo que recebeu resíduos, pois tem origem exclusivamente microbiana.

De modo geral, a atividade enzimática do solo é proporcional ao seu teor de matéria orgânica. Por essa razão, pelo fato de que a aplicação de alguns resíduos aumentam o teor de matéria orgânica do solo, sobretudo em trabalhos de longo prazo, a atividade enzimática é apresentada em relação ao teor de matéria orgânica do solo. Assim, eventuais efeitos inibitórios de substâncias tóxicas tornam-se mais evidentes, obtendo-se melhores correlações com os teores, por exemplo, de elementos-traço no solo (Roig et al., 2002).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Distribuições parceladas de resíduos ao solo ao longo do tempo, considerando a demanda da cultura (geralmente o teor de nitrogênio) ou o aporte tolerado de alguma substância potencialmente prejudicial (e.g. elementos-traço, sódio, etc.) levam a menores riscos ambientais como ecotoxicidade e perda de nitrato por lixiviação, do que aplicações únicas. Todavia, as áreas que recebem tais resíduos precisam receber especial atenção quanto ao monitoramento de longo prazo, não apenas quanto a presença de um eventual contaminante, mas por meio da avaliações de funções do solo intermediadas por processos biológicos e/ou bioquímicos, à semelhança do que é feito em ensaios ecotoxicológicos com organismos teste.

Os atributos microbiológicos podem ser ferramentas úteis no monitoramento de solos que receberam resíduos. A escolha dos bioindicadores a serem utilizados dependerá das características do resíduo quanto à quantidade e nível de estabilização biológica do C nele contido, forma predominante do N, tempo e forma de aplicação, além dos teores de demais nutrientes e contaminantes, sobretudo Na e elementos-traço. É preciso ainda considerar a presença de contaminantes biológicos, de modo a aumentar a segurança nas aplicações de resíduos ao solo.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M.A.K.; AQUINO NETO, V.; CAMARGO, O.A.; & CANTARELLA, H. Mineralização do nitrogênio em solos tratados com lodo de curture. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:547-555, 2007.
- ANDERSON, T.H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 98:285-293, 2003.
- CARMO, K.B. Efeitos do lodo de esgoto e do fosfato de Gafsa em propriedades químicas, bioquímicas e microbiológicas de um Latossolo Vermelho. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010. 53p.
- KISHINO, N. Propriedades microbiológicas, bioquímicas, químicas e crescimento de plantas de soja e trigo em solos acrescidos de lodo galvânico. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011. 72p.
- MARTINES, A.M.; NOGUEIRA, M.A.; SANTOS, C.A.; NAKATANI, A.S.; ANDRADE, C.A.; COSCIONE, A.R.; CANTARELLA, H.; SOUSA, J.P. & CARDOSO, E.J.B.N. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge. *Bioresource Technology*, 101:4690-4696, 2010.
- NAKATANI, A.S.; MARTINES, A.M.; NOGUEIRA, M.A.; FAGOTTI, D.S.L.; OLIVEIRA, A.G.; BINI, D.; SOUSA, J.P. & CARDOSO, E.J.B.N. Changes in the genetic structure of bacteria and microbial activity in an agricultural soil amended with tannery sludge. *Soil Biology & Biochemistry*, 43:106-114, 2011.
- NAKATANI, A.S.; NOGUEIRA, M.A.; MARTINÊS, A.M.; SANTOS, C.A.; BALDESIN, L.F.; MARSCHNER, P. & CARDOSO, E.J.B.N. Effects of tannery sludge application on physiological and fatty acid profiles of the soil microbial community. *Applied Soil Ecology*, 61:92-99, 2012.
- PAULA, A.M.; FONSECA, A.F.; CARDOSO, E.J.B.N. & MELFI, A.J. Microbial Metabolic Potential affected by surplus wastewater irrigation in tropical soil cultivated with Tifton 85 Bermuda Grass (*Cynodon dactylon* Pers. X *C. niemfuensis* Vanderyst). *Water, Air and Soil Pollution*, 205:161-171, 2010.
- PANCHONI, L.C. Potencial de lixiviado de aterro sanitário como fonte de nutrientes e efeitos em propriedades do solo. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011. 46p.
- ROIG, N.; SIERRA, J.; MARTÍ, E.; NADAL, M.; SCHUHMACHER, M. & DOMINGO, J.L. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158:41-48, 2012.
- SANTOS, C.A.; PANCHONI, L.C.; BINI, D.; KUWANO, B.; CARMO, K.B.; SILVA, S.M.C.P.; MARTINES, A.M.; ANDRADE, G.; ANDRADE, D.S.; CARDOSO, E.J.B.N.; ZANGARO, W. & NOGUEIRA, M. A. Land application of municipal landfill leachate: fate of ions and ammonia volatilization. *Journal of Environmental Quality*, 42:523-531, 2013.
- TEJADA, M.; PARRADO, J.; HERNÁNDEZ, T. & GARCÍA, C. The biochemical response to different Cr and Cd concentrations in soils amended with organic wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 185:204-211, 2011.