

Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação

Co-disposal of sewage sludge in Brazilian sanitary landfills: technical considerations and minimal criteria for application

Jacqueline Rogéria Bringhenti^{1*}, Maria Eugenia Gimenez Boscov²,
Roque Passos Piveli², Wanda Maria Risso Günther²

RESUMO

O tratamento dos esgotos sanitários gera resíduos, destacando-se o lodo, continuamente e em grande volume. Como a reciclagem da matéria orgânica do lodo apresenta restrições ambientais e sanitárias, a codisposição em aterros sanitários é alternativa interessante, principalmente pelo menor custo. A introdução de novo rejeito no aterro, com características físicas e geotécnicas distintas dos resíduos sólidos urbanos, necessita de prévia avaliação dos efeitos sobre a operação, a estabilidade e o uso futuro da área. O presente artigo enfocou a problemática da codisposição de lodos de estações de tratamento de esgotos sanitários em aterros sanitários sob o ponto de vista técnico e ambiental. Critérios de codisposição foram selecionados e submetidos à avaliação de especialistas brasileiros. O resultado foi hierarquizado por grau de importância, gerando um grupo de critérios mínimos de codisposição, representativos e de aplicação prática, constituído por: periculosidade; controle quantitativo; proporção rejeito/lodo; rotina de monitoramento; controle qualitativo; e monitoramento geoambiental, a ser considerado na decisão quanto à codisposição de lodo em aterros. Este grupo poderá contribuir para o aperfeiçoamento de critérios de projeto e operação de aterros sanitários com codisposição de lodo de estações de tratamento de esgotos, visando à disposição final segura e adequada, assim como embasar o planejamento e a execução de políticas públicas e ações mais apropriadas e sustentáveis para o setor.

Palavras-chave: resíduos sólidos; lodo; biosólidos; codisposição; aterros sanitários; critérios técnicos.

ABSTRACT

Sanitary sewage treatment generates residues, particularly sludge, whose production is continuous and voluminous. Since there are environmental and economic restrictions for recycling the organic matter present in sewage sludge, co-disposal in sanitary landfills is an interesting low-cost alternative. The effects of adding sewage sludge, on the operation, stability and post-closure use of the landfill, must be accounted for, since its geotechnical and physical properties are very different from those of municipal solid waste. This paper focused on the issues of co-disposal of sewage sludge in sanitary landfills from the technical and environmental standpoints. Co-disposal criteria were selected and then evaluated by experts. The results were ordered according to their level of importance, thus consolidating a group of essential criteria, representative and of practical application, to be considered in decision making about co-disposal: hazardousness, quantitative control, waste/sludge ratio, monitoring routine, qualitative control and geo-environmental monitoring. This set of criteria should also be considered in the design and operation of sanitary landfills with sludge co-disposal, as well as in the elaboration of sustainable public policies for the sector.

Keywords: solid waste; sludge; biosolids; co-disposal; sanitary landfills; technical criteria.

¹Instituto Federal do Espírito Santo - Vitória (ES), Brasil.

²Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

*Autor correspondente: jacquelineb@ifes.edu.br

Recebido: 13/10/2013 - Aceito: 19/06/2017 - Reg. ABES: 124980

INTRODUÇÃO

Segundo relatório do Fundo das Nações Unidas para a Infância (*United Nations Children's Fund* — UNICEF) e da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 2013, referente aos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), 37% da população mundial não tem acesso a instalações sanitárias adequadas, ou seja, utilizam instalações públicas ou compartilhadas, ou instalações sem condições mínimas de higiene, ou ainda defecam a céu aberto. Mesmo nas economias em rápido crescimento (países do grupo BRIC — Brasil, Rússia, Índia e China), grande número de pessoas continua a fazer suas necessidades a céu aberto: 626 milhões de pessoas na Índia, 14 milhões na China e 7,2 milhões no Brasil.

No Brasil, em 2008, 55% dos 5.564 municípios existentes contavam com serviços de coleta de esgoto, enquanto apenas 28,5% efetuavam o tratamento; em volume, 14,5 milhões $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de esgoto eram coletados e 5,1 milhões $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, tratados. Embora os índices de tratamento de esgotos no país sejam baixos, a geração de lodo é alta e tende a crescer com a ampliação da cobertura de sistemas de saneamento. Em 2008, o volume tratado representava 68,8% do volume coletado (IBGE, 2010).

A título de exemplo, pode-se citar que para uma população de 200 milhões de habitantes com contribuição *per capita* de 54 $\text{g} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a carga total produzida de DBO será de 10,8 milhões $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$. Considerando-se a aplicação de processo de tratamento com alta produção de lodo, à base de 1 kg de sólidos suspensos (SS) para cada quilo de DBO, a produção total de lodo será de 10,8 milhões $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ de SS. Considerando-se ainda a situação mais desfavorável em termos de volume de lodo resultante, em que o lodo será desidratado em centrífugas e levado ao teor de sólidos de 20%, condição em que apresenta massa específica da ordem de 1.060 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, o volume final de lodo produzido será de cerca de 51.10³ $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de lodo a 20% de sólidos.

O tratamento de esgotos gera resíduos sólidos de forma contínua e em grande escala, que devem ser reaproveitados e/ou dispostos adequadamente para não impactar negativamente o ambiente.

Embora o lodo gerado pelas estações de tratamento de esgotos (ETEs) represente apenas de 1 a 2% do volume do esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo estimado entre 20 e 60% do total gasto com a operação da ETE (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Na prática, os recursos investidos em tratamento de esgotos não incluem soluções para os seus subprodutos, cujo destino tem sido frequentemente negligenciado nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

A busca de soluções para destinação do lodo com foco na recuperação da matéria orgânica (biossólidos) é o caminho sustentável a ser seguido, inclusive recomendado pela Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A aplicação como fertilizante orgânico é viável para alguns tipos de lodo, desde que respeitadas determinadas condições técnicas (BETTIOL

& CAMARGO, 2006). Cabe destacar a Resolução nº 375, de agosto de 2006, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que disciplina o uso agrícola de biossólidos, visando proteger a saúde pública e o meio ambiente (BRASIL, 2006).

Quando a aplicação agrícola do lodo não é viável, alternativas como aproveitamento energético, insumo para indústria cerâmica e da construção civil, e codisposição em aterros de resíduos são consideradas. Entre elas, a codisposição de lodo em aterros sanitários é a opção mais utilizada, principalmente pelo menor custo, no entanto essa alternativa tende a diminuir progressivamente devido a restrições ambientais no mundo inteiro e, particularmente, no Brasil devido à PNRS, que preconiza a não disposição de matéria orgânica com potencial de recuperação em aterros.

Por outro lado, há fatores que se contrapõem à codisposição:

- os aterros sanitários têm dificuldades em tratar eficientemente o lixiviado e é prática comum acordos com ETEs de troca de codisposição de lodo por tratamento do lixiviado;
- a principal meta da PNRS define prazo para a erradicação de lixões, nos quais são dispostos 40% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil; e
- o tratamento do lodo para recuperação da matéria orgânica precisa ser melhorado para atender às exigências da resolução vigente, mesmo para codisposição em aterros.

Em processos de recuperação, sempre resta uma porcentagem de material que não atinge os requisitos necessários para sua aplicação na agricultura e deve ser finalmente disposta. Nesse cenário, espera-se um aumento momentâneo da codisposição de lodo de ETE em aterros sanitários. Portanto, nesta década, a codisposição ainda é alternativa a ser empregada no país para a destinação de lodo de esgotos e não será totalmente descartada mesmo em longo prazo.

O'Kelly (2006) relata que controles mais rigorosos sobre a qualidade das descargas de águas residuais, estabelecidos pelas diretivas da Comunidade Europeia, têm dado origem a volumes crescentes de lodo, sendo o principal destino os aterros sanitários municipais e os aterros exclusivos. Segundo Fyttili e Zabaniotou (2008), 35 a 40% do lodo de esgoto produzido na Europa era destinado a aterros sanitários, seguido do uso agrícola (37%) e da incineração (11%); a Diretiva Europeia para Resíduos (PARLAMENTO EUROPEU, 2008) estabelece, para o ano de 2050, a meta de redução de 50% da quantidade de materiais biodegradáveis enviada para disposição no solo, em relação à quantidade destinada em 2000.

Yang, Zhang e Wang (2015) informam que 80% do lodo de ETE produzido na China é descartado de forma inadequada, enquanto que o percentual destinado de forma adequada é disposto em aterro sanitário. De acordo com Lo, Zhou e Lee (2002), a maior parte do lodo de ETE produzido em Hong Kong também estava sendo enviada a aterro sanitário.

EFEITOS RELACIONADOS À CODISPOSIÇÃO DE LODOS EM ATERRO SANITÁRIO

A implantação de aterros sanitários é precedida de projeto técnico que deve garantir a estabilidade da massa de resíduos com base nos seguintes parâmetros:

- o tamanho e a altura da célula diária e do aterro final;
- o equipamento e o grau de compactação requerido para os resíduos;
- a declividade dos taludes;
- os sistemas de drenagem de águas pluviais, lixiviado e gases gerados.

A introdução em aterros sanitários de quantidades crescentes de lodo de esgoto, que mesmo após processos de desidratação ainda apresenta grande porcentagem de água, pode causar instabilidade de taludes, comprometendo a segurança operacional durante sua incorporação (LO; ZHOU; LEE, 2002; BOSCOV, 2008; JIANGUO *et al.*, 2010), devido aos baixos parâmetros de resistência ao cisalhamento e à grande quantidade de líquido introduzida no maciço sanitário, aumentando as poropressões. Alguns operadores de aterros sanitários relutam em aceitar o lodo bruto devido à possibilidade de causar instabilização na massa de resíduos e por aumentar a geração de lixiviado. Por isso, o lodo a ser encaminhado para os aterros deve ser adequadamente seco ou desidratado, para permitir um fator de segurança mínimo desejável quanto à estabilidade dos taludes (O'KELLY, 2005), o que não é alcançado pelos processos normais de desidratação, os quais resultam em um material saturado e de baixa resistência.

Além dessa questão relevante, outros potenciais problemas e dificuldades operacionais são relatados na literatura (CHAN; CHU; WONG, 1999; FOURIE; RÖHRS; BLIGHT, 1999), como:

- odor, decorrente do grau de estabilização do lodo;
- incremento da geração de lixiviado;
- aumento da geração de gases;
- necessidade de implementação de novas rotinas de controle;
- comprometimento do uso previsto para a área.

Com a finalidade de reduzir esses efeitos negativos esperados, os órgãos ambientais brasileiros têm fixado, no momento do licenciamento da codisposição de lodos em aterros sanitários, teores mínimos de sólidos totais nos lodos, que variam entre 25 e 30%. Porém, apesar da adoção de critérios para essa prática, o país carece de normas e regulamentos técnicos específicos sobre o assunto.

A codisposição de lodo em aterros sanitários é prática comum em todo o país, porém não vem acompanhada de estudos geotécnicos aprofundados para indicar a melhor alternativa operacional ou mesmo considerando a codisposição no projeto. A quantidade de lodo recebida baseia-se antes na prática e nos acordos firmados com as ETEs, carecendo-se da padronização de parâmetros de aplicação de lodo em aterros sanitários.

Os aterros de resíduos têm sido projetados, em termos de segurança estrutural, segundo os princípios da mecânica dos solos, considerando-se cada tipo de resíduo como nova unidade geotécnica. Embora pesquisas venham sendo realizadas sobre o comportamento geotécnico do lodo de ETE (BRINGHENTI, 1998; FEITOSA; OLIVEIRA; FERREIRA, 2010; FERREIRA *et al.*, 2011; AGODA-TANDJAWA *et al.*, 2013; entre outros), o nível de conhecimento das características e das propriedades geotécnicas desse lodo, para diferentes tipos e níveis de secagem, ainda é limitado (O'KELLY, 2006).

A presença do lodo pode comprometer a operação e a estabilidade do aterro sanitário, agravando aspectos ambientais, com consequentes efeitos à saúde. Neste trabalho, são apresentadas considerações sobre a problemática da codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários, sob o ponto de vista técnico, sanitário e ambiental. Com base nessas considerações, foram realizadas a seleção e a hierarquização, por grau de importância, de um grupo de critérios mínimos como subsídio para a tomada de decisão na implantação e na operação da prática de codisposição de lodo de ETE em aterros sanitários, assim como para embasar o planejamento e a execução de políticas públicas e de ações mais apropriadas e sustentáveis para o setor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Delineamento metodológico e amostra

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas metodológicas, sendo a primeira referente a visitas técnicas e à pesquisa bibliográfica (E1); a segunda, à formulação, ao teste e à aplicação de instrumento de pesquisa (E2), e a terceira, à tabulação de dados, à análise de resultados e à proposição de diretrizes gerais para a codisposição do lodo em aterros sanitários (E3).

As visitas técnicas (E1) foram realizadas em ETEs e aterros sanitários que aplicam a codisposição, nos municípios de Vitória, Espírito Santo, e São Paulo, São Paulo, com a finalidade de conhecer as características do lodo de esgoto e acompanhar as práticas utilizadas para disposição conjunta com RSU. Nessas ocasiões, foram realizadas observações sistemáticas de campo com anotação de pontos críticos referentes à operação dos aterros sanitários e das ETEs e registro dos aspectos relevantes.

Em paralelo, foi realizada pesquisa bibliográfica e documental, assim como foi efetivado contato com técnicos de ETEs e de aterros sanitários, ambos com a finalidade de identificar rotinas e metodologias utilizadas, em âmbito nacional e internacional, para operação de aterros sanitários com codisposição de lodo de esgoto (E2).

As informações levantadas foram organizadas e analisadas para identificação dos aspectos ambientais e sanitários críticos, utilizados como base para a etapa de proposição de diretrizes gerais. Ao final, chegou-se a um grupo preliminar de 11 critérios operacionais e 5 temas centrais, enfocando os aspectos (E3):

- risco ambiental e à saúde humana;
- controle quantitativo;
- controle qualitativo;
- procedimentos operacionais;
- monitoramento geoambiental.

A avaliação dos critérios operacionais selecionados foi realizada por meio de um instrumento de pesquisa que, após pré-teste e ajustes, foi entregue em mãos (23%) ou enviado via internet (77%) a 118 profissionais brasileiros com atuação direta ou indireta no tema. Os participantes atribuíram notas (escala de 1 a 10) como forma de avaliar a importância de cada critério. Os profissionais entrevistados foram agrupados, segundo experiência profissional em relação ao tema, em:

- órgãos ambientais (G1);
- companhias de saneamento (G2);
- limpeza pública, operação e disposição final em aterros e consultoria em resíduos sólidos (G3);
- professor e pesquisador de universidades (G4).

Os dados foram tabulados e submetidos à análise descritiva para avaliar o grau de importância atribuído a cada critério. Para classificação dos indicadores em termos de importância, foram estabelecidos graus para as notas atribuídas pelos especialistas, segundo os seguintes intervalos: pouca importância (0 a 3), média importância (4 a 7) e muita

importância (8 a 10). O tratamento dos dados foi realizado por meio do programa computacional Microsoft Excel 2010, compreendendo a execução das análises estatísticas descritivas das notas e o enquadramento dos critérios na escala de importância segundo sua média.

Com base nos resultados desta avaliação, são propostos critérios mínimos acerca da codisposição do lodo em aterros sanitários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As respostas válidas, obtidas a partir da aplicação do instrumento de pesquisa (E3), vieram de 54 profissionais atuantes em 12 estados brasileiros, contemplando todas as regiões do país, a maioria deles pertencente à Região Sudeste, de maior desenvolvimento socioeconômico e que abriga grande número de ETEs em funcionamento. O nível de instrução dos participantes registrou: graduação (16,7%), especialização (18,5%), mestrado (40,7%) e doutorado (24,1%). Dos entrevistados, 50,0% possuem experiência com operação de aterros sanitários; 89,0% há 2 anos ou mais, 7,5% entre 1 e 2 anos e 3,5% há menos de 2 anos.

A distribuição dos diversos grupos profissionais resultou em: 9/54 de órgãos ambientais (G1); 17/54 das companhias de saneamento (G2); 15/54 do setor de resíduos sólidos (G3) e 13/54 das universidades (G4).

Os 11 critérios apresentados aos entrevistados para análise encontra-se relacionado no Quadro 1, classificados segundo a responsabilidade e a temática.

Quadro 1 – Critérios referentes à codisposição de lodos de estação de tratamento de esgoto em aterros sanitários.

Critério	Descrição	Responsabilidade	Temática
C1: Periculosidade	O lodo não deve possuir características que lhe confirmem periculosidade.	Operador do aterro sanitário e da ETE (corresponsabilidade)	Risco ambiental e à saúde humana
C2: Emissão de odores	O lodo deve estar biologicamente estável.		
C3: Controle quantitativo	Controle rotineiro da quantidade, da origem, da data e do horário do lodo que entra no aterro.	Operador do aterro sanitário	Controle quantitativo
C4: Proporção rejeito/lodo	Avaliar periodicamente a proporção entre rejeitos e lodo disposto no aterro.		
C5: Rotina de monitoramento	Monitorar a qualidade do lodo, em função de padrões ambientais e sanitários pertinentes.	Operador da ETE	Controle qualitativo
C6: Controle da umidade	Realizar controle rotineiro da umidade da torta de lodo que sai da ETE para o aterro.		
C7: Controle qualitativo	Realizar controle qualitativo do lodo que entra no aterro com rotina de avaliação da umidade.		
C8: Operação da célula	Misturar o lodo aos rejeitos antes da etapa de compactação das células do aterro.	Operador do aterro sanitário	Operação do aterro sanitário
C9: Aterramento gradual	Aterrar o lodo de forma controlada para evitar a formação de pontos de acúmulo.		
C10: Estabilidade do aterro	Dispor o lodo preferencialmente em frentes de trabalho próximas ao terreno natural, evitando as bordas.		
C11: Monitoramento geoambiental	Monitorar o ambiente para atender às exigências legais pertinentes, incluindo as águas subterrâneas e a estabilidade geotécnica.	Operador do aterro sanitário e da ETE (corresponsabilidade)	Monitoramento geoambiental

ETE: estação de tratamento de esgoto.

Em função da diferença de perfis profissionais, foi incluída no questionário a opção de o entrevistado não atribuir nota a algum dos indicadores apresentados para avaliação, em caso de dúvida ou desconhecimento, o que resultou na variação do número de respostas válidas (N) entre os indicadores avaliados. O resultado da avaliação quantitativa dos indicadores é apresentado na Tabela 1.

O número de respostas obtidas permitiu a realização da análise descritiva dos dados coletados. Para tal, definiu-se que cada um dos critérios apresentados aos entrevistados para avaliação (Quadro 1) seria tratado como uma variável. A análise descritiva dos resultados encontra-se na Tabela 1, que relaciona a variável, o espaço amostral válido (N), as notas mínimas e máximas atribuídas pelos entrevistados a cada um dos critérios, a nota média, o desvio padrão e o intervalo de confiança.

A nota média atribuída aos 11 indicadores pelos diversos grupos de entrevistados variou entre 7,44 e 9,57. O enquadramento ocorreu nos graus média importância (27,0%) e muita importância (73,0%). Não houve critério cuja média amostral se enquadrasse no intervalo de pouca importância.

Os critérios que receberam notas médias mais altas, considerados como de muita importância, em escala decrescente, foram:

- C11: monitoramento geoambiental;
- C1: periculosidade;
- C5: rotina de monitoramento;
- C7: controle qualitativo;

Tabela 1 - Análise descritiva das variáveis.

Variável	N	Nota mínima	Nota máxima	Nota média	Desvio padrão	Intervalo de confiança
C1: periculosidade	53	4	10	9,26	1,37	0,13
C2: emissão de odores	54	2	10	7,44	1,98	0,19
C3: controle quantitativo	54	3	10	8,59	1,68	0,16
C4: proporção rejeito/lodo	52	4	10	8,62	1,61	0,15
C5: rotina de monitoramento	52	7	10	9,10	1,01	0,10
C6: controle da umidade	50	1	10	8,68	1,75	0,17
C7: controle qualitativo	51	4	10	8,92	1,34	0,13
C8: operação da célula	44	3	10	8,39	1,85	0,17
C9: aterramento gradual	43	1	10	7,51	2,79	0,26
C10: estabilidade do aterro	44	1	10	7,91	2,27	0,21
C11: monitoramento geoambiental	49	6	10	9,57	0,91	0,09

- C6: controle da umidade;
- C4: proporção rejeito/lodo;
- C3: controle quantitativo;
- C8: operação da célula.

O grupo de média importância foi representado por:

- C10: estabilidade do aterro;
- C9: aterramento gradual;
- C2: emissão de odores.

Observa-se que o critério mais bem avaliado se refere ao monitoramento geoambiental do aterro, estando também contemplados os temas referentes ao risco ambiental e à saúde, à operação e ao controle quantitativo e qualitativo do processo de codisposição no aterro sanitário, dentre os que tiveram as maiores notas.

A representação do resultado das notas atribuídas aos 11 critérios estudados é apresentada na Figura 1, por meio da qual é possível realizar análise de convergência das notas obtidas para os critérios. Os critérios selecionados menos convergentes são os C6 (controle da umidade), C9 (aterramento gradual) e C10 (estabilidade do aterro), enquanto os demais apresentam boa convergência, em especial o C11 (monitoramento geoambiental).

A sistematização dos critérios considerados muito importantes, segundo o perfil dos grupos de entrevistados, é apresentada na Figura 2.

Observa-se que os critérios periculosidade (C1), rotina de monitoramento (C5), controle qualitativo (C7) e monitoramento geoambiental do aterro (C11) foram considerados de muita importância por todos os grupos de especialistas que participaram da pesquisa.

Bertanza, Baroni e Canato (2016) propuseram um modelo para tomada de decisão referente ao manejo de lodo de ETE baseado em mais de 30 parâmetros, incluindo fatores técnicos, ambientais, administrativos,

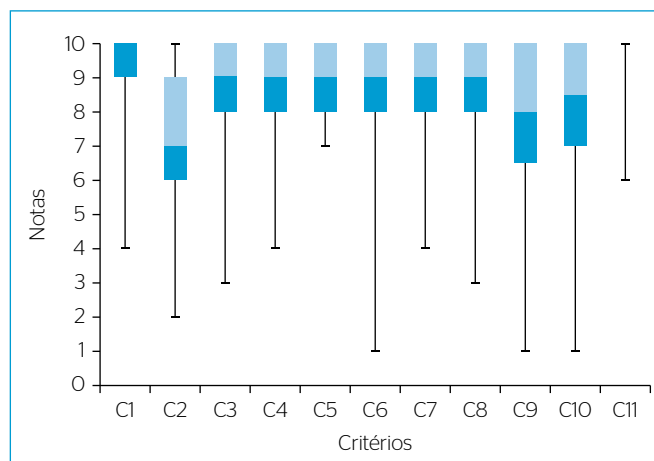


Figura 1 - Representação da variação das notas atribuídas aos critérios propostos.

econômicos e sociais. Os autores relacionam a avaliação ambiental com os potenciais impactos sobre os ecossistemas e a saúde humana. Por sua vez, Fytili e Zabaniotou (2008) abordam restrições referentes ao acúmulo de substâncias indesejadas no lodo de ETE com potencial de atingir a cadeia alimentar. No presente estudo, os temas centrais “risco ambiental e à saúde humana” e “controle qualitativo”, que agregam respectivamente os critérios como C1 (periculosidade) e C5 (rotina de monitoramento), também exploram tal avaliação.

Os critérios C3, C4 e C9, respectivamente controle quantitativo, proporção rejeito/lodo e aterramento gradual, foram considerados em grau de importância menor pelo grupo de entrevistados com atuação em órgãos ambientais (G1), o que pode ser atribuído ao seu caráter mais operacional. Tais critérios estão relacionados à estabilidade do maciço sanitário e contribuem para minimizar os potenciais impactos ambientais negativos dessa alternativa de disposição em aterros sanitários.

Por sua vez o critério C6, referente ao controle de umidade, recebeu avaliação inferior dos representantes de companhias de saneamento (G2). Cabe destacar que os critérios C5 e C6 propõem atribuir aos operadores das ETEs a responsabilidade pelo monitoramento rotineiro da qualidade do lodo enviado ao aterro.

O critério C9 (aterramento gradual) foi considerado de muita importância exclusivamente pelos representantes das universidades (G4), talvez em função de sua especificidade.

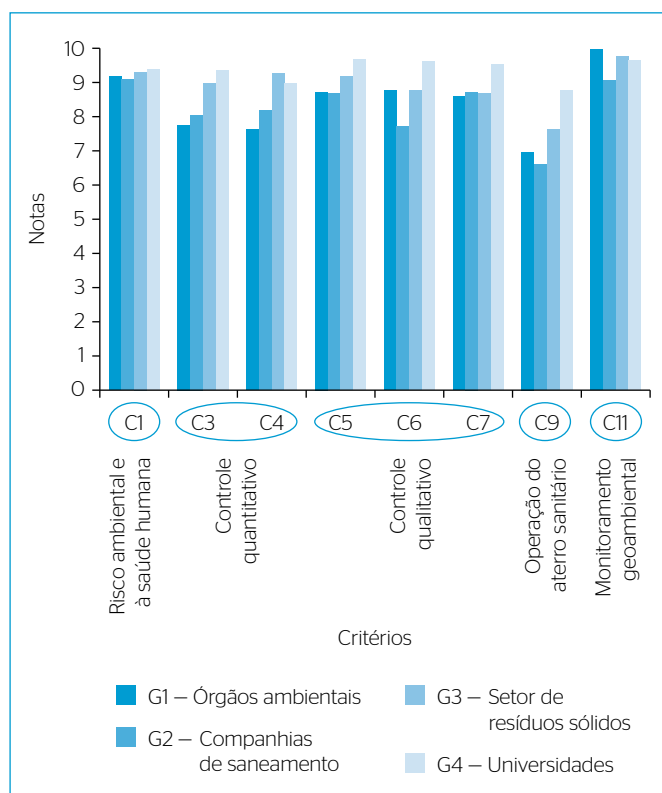


Figura 2 - Critérios considerados muito importantes, por grupo de entrevistados.

Visando minimizar eventuais limitações da metodologia adotada, no instrumento de pesquisa utilizado havia a possibilidade de o entrevistado apresentar comentários e sugestões, o que contou com a contribuição de 27 dentre os 54 profissionais participantes, enfocando os critérios avaliados e outros assuntos relacionados. Tais informações qualitativas foram organizadas segundo os critérios relacionados, a ideia central e o perfil do entrevistado, conforme apresentado no Quadro 2.

Os critérios C3 (controle quantitativo) e C4 (proporção rejeito/lodo) tiveram maior número de citações (9 citações cada), seguido de C6 (controle da umidade) (7 citações), C7 (controle qualitativo) (6 citações) e C1 (periculosidade), C5 (rotina de monitoramento) e C10 (estabilidade do aterro) (5 citações), ressaltando-se, nessa ordem, a relevância dos critérios indicados.

O critério C7 (controle qualitativo) (umidade) merece atenção pelo fato de propor o controle rotineiro da qualidade do lodo na entrada do aterro. Como investigação paralela, inicialmente foi avaliada a aplicação de ensaio de campo conhecido como análise do teor e líquidos livres, cujo procedimento está normalizado pela Norma Brasileira (NBR) nº 12.988, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993). Em experimentos laboratoriais preliminares, realizados com amostras de lodo coletadas na etapa metodológica de visita às ETEs, constatou-se que o teste não é aplicável a lodos condicionados com polímero. Suspeita-se que o polímero altere as características da massa de lodo, conferindo a ela consistência de gel, isto é, apesar do alto teor de umidade, não se observa a presença de líquidos livres. Essa observação indica que esse teste não é adequado à torta de lodo na qual foram aplicados polímeros na etapa de desaguamento.

Atualmente, estão disponíveis no mercado as balanças analisadoras de umidade ou analisadores de umidade, que permitem determinar o teor de umidade de uma amostra de lodo em cerca de 10 minutos e poderiam ter aplicação prática no controle qualitativo rotineiro proposto. Trata-se de método gravimétrico e geralmente utilizam sistemas de secagem por radiação infravermelha até que a amostra analisada tenha o peso constante, reduzindo o tempo requerido para a realização das análises por meio das técnicas clássicas (24 horas).

De forma ilustrativa, são listadas outras citações não enquadradas no grupo de critérios apresentados para avaliação:

- metas de redução gradativa do volume de lodo a ser codisposto em aterros sanitários são necessárias. A prática da codisposição reduz a vida útil do aterro, devendo-se dar prioridade a outras alternativas (G1 — órgãos ambientais, G2 — companhias de saneamento e G4 — universidades);
- a codisposição de lodo de ETE somente deveria ser permitida para aterros sanitários de médio e grande porte, em função da capacidade técnica, operacional e do risco ambiental e sanitário associado a eles (G3 — projetista/operador de aterros sanitários);

Quadro 2 - Citações dos entrevistados em função dos critérios apresentados.

Critério	Ideia central - síntese	Citações por grupos de entrevistados			
		G1	G2	G3	G4
C1 Periculosidade	É o mais importante, podendo englobar os outros critérios propostos de monitoramento qualitativo (C6 e C7).	1		1	3
C2 Emissão de odores	Na prática existe tolerância em relação a odores. Deve-se dar maior ênfase à estabilidade avançada do lodo, seguindo tendência europeia.		2	1	2
C3 Controle quantitativo	Deve-se estabelecer as condições de recebimento de lodo em função da licença ambiental, sendo importante fixar a quantidade de lodo a ser codisposta diariamente.	1	3	4	1
C4 Proporção rejeito/lodo	A proporção rejeito/lodo é fundamental para a fixação de critérios operacionais.	1	2	2	4
C5 Rotina de monitoramento	Deve incluir o controle de umidade (C7) na rotina de monitoramento.	1	2	1	1
C6 Controle da umidade	A umidade é o principal parâmetro a ser monitorado, diretamente relacionada à estabilidade do aterro.	1	4	2	
C7 Controle qualitativo	Os responsáveis pelo controle deverão ser treinados e estar familiarizados com a atividade, devendo existir rotina de análises laboratoriais periódicas para aferição das variáveis. O controle por meio de ensaio de campo (teor de líquidos livres) é ineficaz para o lodo desidratado.	1	3	2	
C8 Operação da célula	A mistura lodo/rejeito previamente à colocação no aterro resulta em melhores condições de coesão, reduzindo riscos associados.	1	2	1	
C10 Estabilidade do aterro	A estabilidade do aterro é fator limitante, necessitando de parecer profissional especializado em Geotecnia. Direcionar a disposição do lodo para pontos próximos ao terreno natural pode evitar feições preferenciais de instabilidade do maciço sanitário. Mapear as áreas de disposição do lodo no aterro sanitário.		2	3	1
C11 Monitoramento geoambiental do aterro	O monitoramento ambiental deve ser um procedimento padrão para aterros sanitários. Deve considerar a influência das chuvas.	1	1	1	

- a codisposição de lodo em aterros sanitários resulta no incremento da produção de gases, levando à formação de “bolsões de biogás” (G4 — universidades);
- a saúde dos trabalhadores envolvidos na operação do aterro sanitário que recebe lodo de ETE em codisposição é aspecto a ser considerado fator de preocupação (G2 — companhias de saneamento).

A preocupação com a restrição ao envio de lodo de ETE aos aterros sanitários também foi citada por diversos autores (FYTILI & ZABANIOTOU, 2008; KELESSIDIS & STASINAKIS, 2012; BERTANZA; BARONI; CANATO, 2016; entre outros).

Como resultado final, o consenso entre todos os entrevistados levou à definição do grupo de critérios considerados muito importantes na avaliação quantitativa (C1, C5, C7 e C11), acrescidos dos critérios que obtiveram maior número de citações na análise qualitativa (C3 e C4). Esse conjunto representaria os critérios básicos (mínimos) inerentes à operação de aterros sanitários com codisposição de lodos de ETEs.

Assim, o grupo de critérios mínimos representativos proposto é constituído de seis critérios, especificados no Quadro 3.

O grupo de critérios mínimos proposto contempla os principais efeitos negativos relacionados à alternativa de disposição final levantados na literatura, como instabilidade de taludes (C3, C4 e C11) e aumento na geração de lixiviados (C5 e C7). As questões do odor e do incremento na geração de gases estão indiretamente contempladas nos critérios C1 e C11, havendo necessidade de novas pesquisas para avaliar os efeitos da aplicação na prática.

CONCLUSÕES

A alternativa de codisposição de lodo de ETE em aterros sanitários é amplamente difundida no Brasil, apesar dos diversos problemas relacionados a essa prática que podem acarretar impactos geoambientais e sanitários negativos.

Dois dos aspectos mais importantes são: o excesso de água e a baixa resistência ao cisalhamento do lodo de ETE. A codisposição do lodo pode dificultar a operação, aumentar o risco de instabilidade

Quadro 3 - Critérios mínimos para codisposição de lodos de estação de tratamento de esgoto em aterros sanitários, por aspecto abordado.

Critérios mínimos	Aspectos
Periculosidade (C1)	Risco ambiental e à saúde humana
Controle quantitativo (C3)	Controle quantitativo
Proporção rejeito/lodo (C4)	
Rotina de monitoramento (C5)	Controle qualitativo
Controle qualitativo (C7)	
Monitoramento geoambiental (C11)	

do maciço sanitário e certamente diminuir a vida útil do aterro, além de apresentar um risco a mais de contaminação da área. É necessário avaliar previamente a quantidade de lodo a ser codisposta em proporção à quantidade de RSU para que não haja interferência significativa nos processos de biodegradação, na operação e na estabilidade do aterro sanitário.

Observa-se, contudo, escassez de pesquisas que enfoquem os problemas gerados pela codisposição de lodo de ETE em aterros sanitários, mesmo no Brasil, onde essa prática é muito difundida. Este estudo apresentou um método para identificar e selecionar os critérios mais importantes que devem nortear trabalhos e fornecer diretrizes sobre o tema em foco, visando a normas e procedimentos futuros. O método compreendeu três etapas: visitas técnicas e pesquisa bibliográfica; formulação, teste e aplicação de instrumento de pesquisa (54 entrevistados, 11 critérios propostos, avaliação por meio de notas de 1 a 10); e

tabulação e análise de resultados, que levou à definição do grupo de critérios mínimos.

O grupo de critérios mínimos resultou composto pelos seguintes critérios: periculosidade (o lodo não deve apresentar características que lhe confirmem periculosidade), critério quantitativo (controle rotineiro de quantidade, origem e horário de chegada), critério qualitativo (umidade), proporção rejeito/lodo (controle periódico das quantidades aterradas e sua proporção), rotina de monitoramento (qualidade do lodo, segundo padrões sanitários e ambientais) e monitoramento geoambiental (estabilidade do maciço e qualidade das águas subterrâneas).

Apesar de se definir um grupo de critérios mínimos (6), recomenda-se que os aspectos relativos a este grupo sejam investigados em maior profundidade para a proposição de valores orientadores para projeto e operação de aterros sanitários que aceitem lodo de esgoto em codisposição.

REFERÊNCIAS

- AGODA-TANDJAWA, G.; DIEUDÉ-FAUVEL, E.; GIRAULT, R.; BAUDEZ, J. C. (2013) Using water activity measurements to evaluate rheological consistency and structure strength of sludge. *Chemical Engineering Journal*, v. 228, p. 799-805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.012>
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Orgs.). (2001) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG; Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná. v. 6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1993) *NBR 12988: líquidos livres: verificação em amostra de resíduos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- BERTANZA, G.; BARONI, P.; CANATO, M. (2016) Ranking sewage sludge management strategies by means of Decision Support Systems: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 110, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.011>
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (2006) A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Orgs.). *Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. p. 25-36.
- BOSCOV, M. E. G. (2008) *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos. 248 p.
- BRASIL. (2010) 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 União*, Brasília, Seção 1, p. 3. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 8 out. 2013.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2006) Resolução nº 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 União*, Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2013.
- BRINGHENTI, J. R. (1998) *Efeitos da Codisposição de Lixo Urbano e Lodo de ETE em Aterros Sanitários*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CHAN, Y. S. G.; CHU, L. M.; WONG, M. H. (1999) Codisposal of municipal refuse, sewage sludge and marine dredgings for methane production. *Environmental Pollution*, Barking, v. 106, n. 1, p. 123-128. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00051-2)
- FEITOSA, M. C. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; FERREIRA, S. R. M. (2010) Uso de lodo de esgoto para melhoramento de solo colapsível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15, Gramado. Gramado: ABMS. v. 1. p. 1-9.
- FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; MESSIAS, A. S.; SILVA, H. A.; NASCIMENTO, A. E.; FEITOSA, M. C. A. (2011) Hydraulic conductivity and soil-sewage sludge interactions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1569-1577. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000500011>
- FOURIE, A. B.; RÖHRS, L. H.; BLIGHT, G. E. (1999) Evaluating the increased risk of leachate generation resulting from codisposal of sewage sludge in a municipal solid waste landfill in a semi-arid climate. *Waste Management & Research*, Londres, v. 17, n. 1, p. 27-36. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3070.1999.00015.x>

- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. (2008) Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 12, n. 1, p. 116-140. <https://www.researchgate.net/derof/dx.doi.org%2F10.1016%2Fj.rser.2006.05.014>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010) *Pesquisa nacional de saneamento básico*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1691&id_pagina=1>. Acesso em: 12 out. 2010.
- JIANGUO, J.; YONG, Y.; SHIHUI, Y.; BIN, Y.; CHANG, Z. (2010) Effects of leachate accumulation on landfill stability in humid regions of China. *Waste Management*, Nova York, v. 30, n. 5, p. 848-855. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.005>
- KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A. S. (2012) Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, Nova York, v. 32, n. 6, p. 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>
- LO, I. M. C.; ZHOU, W. W.; LEE, K. M. (2002) Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfill disposal. *Canadian Geotechnical Journal*, Ontário, v. 39, n. 5, p. 1139-1149. <https://doi.org/10.1139/t02-058>
- O'KELLY, C. B. (2005) Sewage sludge to landfill: some pertinent engineering properties. *Journal of the Air and Waste Management Association*, Petesburgo, v. 55, n. 6, p. 765-771.
- _____. (2006) Geotechnical properties of municipal sewage sludge. *Geotechnical and Geological Engineering*, Dordrecht, v. 24, n. 4, p. 833-850. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-6611-8>
- PARLAMENTO EUROPEU. (2008) Directiva 2008/98/CE, de 19 de novembro de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de la Unión Europea*. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:ES:PDF>>. Acesso em: 29 ago. 2013.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2013) *Progress on sanitation and drinking-water: 2013 update*. Geneva.
- YANG, G.; ZHANG, G.; WANG, H. (2015) Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Research*, v. 78, p. 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.002>