



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais – Brasil

Rosângela Francisca de Paula Vitor Marques¹, Antônio Marciano da Silva², Luciano dos Santos Rodrigues³, Luana Ferreira Mendes⁴, Alisson Souza de Oliveira⁵

¹ IDocente do programa de Pós Graduação Sustentabilidade em Recursos Hídricos, Universidade Vale do Rio Verde (UNINCOR), CEP: 37410-000, Três Corações (MG), Brasil, Tel.: (+55 35) 98812-8207, roeflorestal@hotmail.com (corresponding author). ²Professor Emérito do Programa de pós graduação Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras (UFLA), CEP: 37200-900, Lavras (MG), Brasil, Tel.: (+55 35) 99959-3264, amarcianos@gmail.com, ³Docente do Departamento de Medicina Veterinária preventiva da Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), CEP: 31270-901, Belo Horizonte (MG), Brasil Tel.: (+55 31) 98832-5904, lsantosrodrigues@gmail.com, ⁴ Mestranda do programa de Pós Graduação Sustentabilidade em Recursos Hídricos, Universidade Vale do Rio Verde (UNINCOR), CEP: 37410-000, Três Corações (MG), Brasil, Tel.: (+55 35) 98704-2470, engluanaferreira@gmail.com, ⁵Docente do programa de Pós Graduação Sustentabilidade em Recursos Hídricos Universidade Vale do Rio Verde (UNINCOR), CEP: 37410-000, Três Corações (MG), Brasil, Tel.: (+55 35) 99914-5021 alissonso@hotmail.com.

Artigo recebido em 21/04/2020 e aceito em 25/04/2021

RESUMO

Objetivou-se avaliar impactos ambientais de diferentes Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos - ADRSU, sobre a contaminação dos solos e como subsídio para o estabelecimento de espécies vegetais, nas áreas encerradas do aterro sanitário (Campo Belo), aterro controlado (Santo Antônio do Amparo) e lixão (Elói Mendes), no Sul de Minas Gerais. Coletaram-se amostras deformadas e indeformadas de solo, nas camadas de 0-20cm, dentro das ADRSU e nas camadas de 0-20 e 20-40cm a montante e jusante de cada área. Realizaram-se análises de densidade global e de partículas, limites de liquidez e plasticidade, porosidade total, condutividade hidráulica, Cr, Cu, Ni, Zn, Cd, Pb e Hg para avaliar o potencial de percolação do chorume no solo. Utilizou-se estatística descritiva e Teste T e os resultados comparados com a Resolução CONAMA 420/2009. Maiores valores de condutividade hidráulica e porosidade foram observadas no aterro sanitário. Não se detectou contaminações por metais pesados nas ADRSU de Campo Belo e Elói Mendes. Observou-se contaminação por Ni e Cr a montante do aterro controlado e sinalização de contaminação em áreas a jusante, além da presença de Cu, possivelmente em decorrência da topografia do terreno. Para o estabelecimento de plantas, o aterro controlado é o mais restritivo

Palavras-chave: características químicas e físicas, contaminação ambiental, áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos.

Impacts of the urban solid waste disposal on the quality of surface water in three municipalities of Minas Gerais – Brazil

ABSTRACT

This study evaluated the environmental impact of different of Disposal of Urban Solid Waste - USWDA, on soil contamination and as a substrate for the establishment of plant species, in the areas already closed of the sanitary landfill of Campo Belo, controlled landfill (Santo Antônio do Amparo) and the dump (Elói Mendes), south of Minas Gerais - Brazil. The deformed and informed soil samples are collected in the 0-20cm layers, within the USWDA and in the 0-20 and 20-40cm layers upstream and downstream of each area. Cr, Cu, Ni, Zn, Cd, Pb, and Hg to evaluate the percolation potential of the leachate (total and particle density, liquidity and plasticity limits, total porosity and hydraulic conductivity) in the soil. Descriptive statistics and T-test were used and results compared with CONAMA Resolution 420/2009. Higher values of hydraulic conductivity and porosity were observed for the sanitary landfill. No heavy metals contamination was detected in the USWDA of Campo Belo and Elói Mendes. It was observed the contamination by Ni and Cr in the areas of controlled landfill, and sign of contamination in the downstream areas, besides the presence of Cu, possibly due to of the terrain topography. For plants establishment, the landfill is controlled the most restrictive.

Keywords: chemical and physical characteristics, Environmental contamination, urban solid waste disposal areas.

Introdução

O crescimento acentuado da população urbana, atrelado ao acelerado aumento da geração de resíduos sólidos, com a disposição final ambientalmente inadequada acarreta em problemas ambientais, por meio do alto potencial de contaminação nos solos pelo chorume, no ar e nas águas superficiais e subterrâneas, alterando suas características físicas, químicas e biológicas, e colocando em risco a saúde humana, principalmente por metais pesados (Aguiar et al 2021, Castilhos Júnior, 2006) que podem se lixiviados no solo e por consequência as águas subterrâneas, ou quando escoados superficialmente, os corpos d'água (Herrero et al, 2020; Ojuri et al 2020) .

Os elementos potencialmente tóxicos como chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), arsênio (As), níquel (Ni) e cromo (Cr) estão presentes em diversos tipos de resíduos nas áreas de disposição final de resíduos sólidos como os lixões a céu aberto e aterros, os quais são encontrados em: lâmpadas, pilhas, baterias, produtos farmacêuticos diversos componentes eletrônicos e outros (MUNÔZ, 2002), sendo indicativos da contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, na área de disposição de resíduos sólidos urbanos (Pinheiro & Mochel , 2018).

Vários estudos de poluição do solo e das águas subterrâneas apontam que áreas de disposição final ambientalmente inadequada, seja pela construção ou má gestão dessas áreas, provocam algum tipo de poluição podendo alterar as características físicas, químicas e biológicas da qualidade do solo e de águas superficiais e subterrâneas, sendo objeto constante de pesquisas (Tenodi et al 2020; Adelopo et al 2018; Faria e Mondeli, 2018; Giang et al. 2018, Faria e Mondeli 2017, Guaniyu et al 2016, Mondeli et al., 2016; Gómez-puentes et al., 2014; Kemerich et al. 2013; Marques et.al. 2012). Porém são observados poucos estudos a fim de comprovar a interferência nessas áreas após o encerramento de de longo tempo de lixões (Marinho, 2020)

Quando a capacidade máxima de aterramento de um aterro sanitário é atingida, o processo de reabilitação do local deve ser iniciado sendo que os materiais deveriam ser repostos na sequência original, com projeto do sistema de cobertura final dos resíduos, minimizando a infiltração de água, além de proporcionar um adequado desenvolvimento da vegetação, reduzindo assim os efeitos dos processos erosivos (Silva et al, 2020, Londe e Bitar, 2011; Magalhães, 2020). Porém, muitas das vezes isso não é realizado

e associando ainda, à instabilidade dos RSU aterrados, pode impedir uma reabilitação dessa área e provocar diversos impactos. Desta maneira, o monitoramento e avaliação das alterações em características de solos construídos sobre aterros de RSU, bem como o seu potencial de uso, podem possibilitar a obtenção de parâmetros que permitam estimar o impacto ambiental desta atividade e assim propor eventuais ajustes.

Nas áreas já encerradas de ADRSU, devido à grande variabilidade do material existente na cobertura final, que muitas das vezes são solos provenientes de áreas de empréstimo e, ainda podem ser oriundos de resíduos de construção civil (Magalhães, et al, 2020; Magalhães 2005), é necessária a caracterização física e, no intuito de identificar potencial de contaminação, a caracterização química.

Dentre os atributos físicos do solo, a condutividade hidráulica é um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade do solo, no que se refere ao processo de infiltração, sendo de grande interesse no estudo de contaminação de solos e águas subterrâneas de solo, decorrente do transporte de elementos químicos, nutrientes e seus impactos ao ambiente (Hurtado et al. 2004)

Neste contexto, objetivou-se avaliar o impacto ambiental das ADRSU nas tipologias, lixão encerrado, aterro controlado e aterro sanitário, decorrente da contaminação do solo, por meio de características físicas e químicas e verificar o potencial de estabelecimento de espécies vegetais no encerramento das áreas. A hipótese do presente estudo é que os impactos da disposição ambientalmente inadequada de resíduos sólidos na qualidade do solo são mais significativos em comparação com os aterros sanitários e que os solos apresentam melhores capacidade de estabelecimento de vegetação nas camadas encerradas, devido à execução de técnicas ambientalmente adequadas.

Material e métodos

O estudo foi realizado nas áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos (ADRSUs) encerradas com base nas formas de disposição (lixões, aterros controlados e aterros sanitários), nos municípios de Elói Mendes - lixão, Santo Antônio do Amparo – aterro controlado e Campo Belo – aterro sanitário, localizados no Sul de Minas Gerais. (Figura1 e Tabela 1).

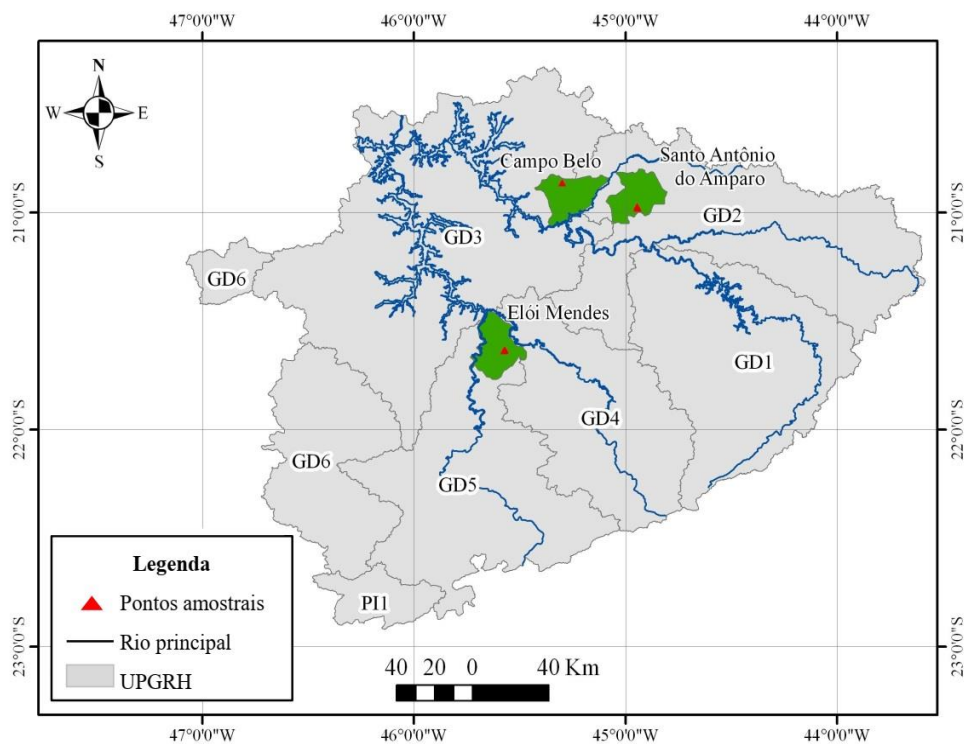


Figura 1. Localização das Áreas de Disposição de Resíduos sólidos urbanos na região Sul de Minas Gerais-Brasil.

Tabela 1. Características dos municípios e identificação das ADRSU

Município	População	Produção de resíduos sólidos (ton/dia)	Tipologia ADRSU	Coordenadas Geográficas	Area (ha)
Elói Mendes	21.907	12,5	lixão	21°37'55" S 45°34'21" W	2.5
Santo Antônio do Amparo	17.255	9,0	Aterro controlado	20°58'34" S 44°56'45" W	3.0
Campo Belo	51.544	30,0	Aterro Sanitário *	20°51'47" S 45°17'45" W	10.53

*Em área adjacente existe um lixão encerrado

Foram realizadas coletas de amostras de solo deformadas e indeformadas para a caracterização física, química e condutividade hidráulica do solo para fins de avaliação do potencial de percolação do chorume no perfil do solo até o lençol freático e, também como subsídio para o estabelecimento de espécies vegetais dentro das áreas encerradas (figuras 2a e 2b).

Visando identificar o potencial de contaminação e avaliar possíveis influências dos metais pesados no processo de revegetação das áreas encerradas devido à proximidade do resíduo sólido urbano à superfície e comparação com as áreas adjacentes, foi realizada a caracterização química de metais pesados no substrato, coletando-se 3 amostras compostas deformadas à montante, três a jusante e três dentro da área na profundidade

de 0-20 cm totalizando 9 amostras compostas por área e perfazendo um total de 27 amostras para as 3 áreas. Foram coletadas também à montante e à jusante de cada ADRSU, 3 amostras compostas cada, na profundidade de 20-40cm, para fins de comparação e identificação do que potencialmente pode ser caracterizado como contaminação do depósito de lixo. Os parâmetros analisados foram: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Não se coletaram amostras nas camadas mais profundas (40-60 cm) devido à proximidade com os resíduos sólidos. As amostras foram embaladas individualmente, identificadas e levadas ao Laboratório de análise de Solo do Departamento de Ciências do solo da Universidade Federal de Lavras para posterior análise, conforme os seus procedimentos, seguindo o protocolo recomendado pela USEPA 3051.

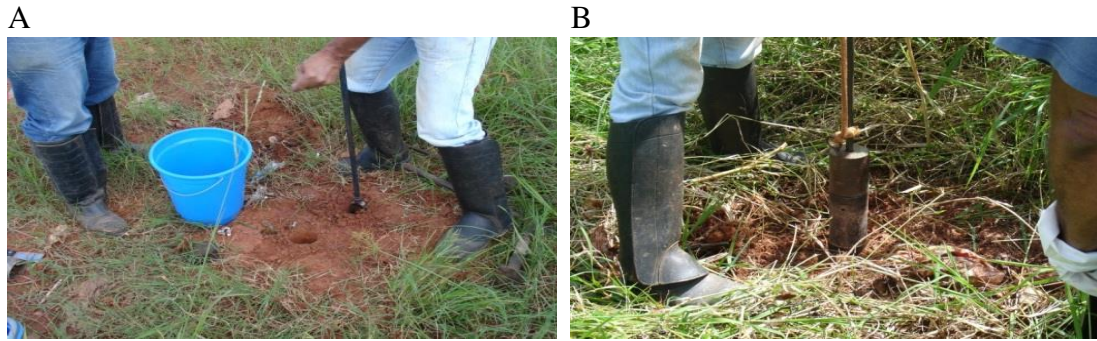


Figura 2. a. Coleta de solo amostras deformadas para análises físicas e químicas e b. coleta de solo amostras indeformadas para determinação da condutividade hidráulica e densidade global.

Para avaliação dos parâmetros físicos foram coletadas amostras simples deformadas (para as análises dos limites de consistência (liquidez e plasticidade)), densidade de partículas (ρ_s), com o auxílio de um trado holandês, e amostras simples indeformadas com o auxílio de um amostrador de Uhland (para as análises de densidade global (ρ_g), porosidade total, e condutividade hidráulica) em nove pontos dentro das ADRSUs nas plataformas e valas já encerradas, mais representativas da área, ou seja, aquelas encerradas há mais tempo.

A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, densidade global e densidade de partículas foram realizadas no Laboratório de Água e solo do Núcleo Didático Científico de Água e Solo do Departamento de Engenharia e as demais no Laboratório de análise de Solo do Departamento de Ciências do solo, ambos os laboratórios da Universidade Federal de Lavras, seguindo metodologia conforme EMBRAPA (1997) para as densidades global, de partícula e porosidade total, Limites de plasticidade conforme preconizado pela NBR 7180/1984, textura de acordo com a NBR 7181/1984 e AST D – 422/63 e a permeabilidade pelo Frasco de Mariotte. Os dados de compactação foram medidos com um penetrógrafo digital do tipo PNT View 2000, até a profundidade de 600 mm e georreferenciados com auxílio de um GPS da marca Garmin.

Para avaliação da contaminação dos solos e potencial contaminação das águas subterrâneas utilizou-se metodologia proposta por CETESB (2005). As amostras de solo coletadas para a análise de metais pesados a montante do depósito de resíduos forneceram, para efeito comparativo, os valores de referência, ou seja, a composição química deste solo sem o contato com o resíduo e seus efluentes. Compararam-se essas amostras,

tendo-se como referência os valores orientadores contidos na Resolução CONAMA 420/2009, os quais se dividem em valor de referência de qualidade, valor de prevenção e valor de intervenção.

Resultados

As plataformas e valas e até mesmo a disposição a céu aberto foram encerradas com apenas 20 cm de terra, proveniente de vários locais de área de empréstimos dentro de cada um dos municípios estudados, encontrando-se abaixo desse limite a massa de lixo. Resultados semelhantes ao de Magalhães et al (2020) onde observaram que o material que compõe a camada final de cobertura, a profundidade era de 25,9 cm. Assim, a caracterização física do substrato se deu na camada de 0 a 20 cm devido a mesma ser potencialmente a camada de recobrimento final nas três áreas (aterro controlado, aterro sanitário e lixão), não sendo o recomendado pela literatura, em que se deve observar 60 cm de camada de solo e uma camada de terra vegetal (FEAM, 2008) para o encerramento. Vale ressaltar que os solos constituintes dessa camada, não são provenientes da área de disposição de resíduos apresentando características diferentes das dos locais de disposição final.

Os valores de densidade do solo, porosidade total, compactação e condutividade hidráulica na camada de 0 -20 cm são apresentados na Tabela 2.

Observou-se que as densidades são semelhantes às observadas por Marinho (2020) para solos antropogênicos variando em média de $1,39 \text{ g cm}^{-3}$, nas quais são correlacionadas negativamente com áreas ambientalmente inadequadas como lixões e PiInheiro & Mochel com densidade variando de $1,23$ a $1,39 \text{ g cm}^{-3}$.

Entretanto, menores concentrações das observadas por Magalhães et al (2020). Ressalta-se, porém, que os valores de densidade do solo do lixão foram semelhantes ao do aterro sanitário, e nesse caso pode estar relacionado com a manutenção e

operação do aterro sanitário em que é necessário o recobrimento diário dos resíduos sólidos, assim necessitando de solos de áreas de empréstimos.

Tabela 2. Valores Médios das Características físicas do substrato das ADRSU.

Município	Densidade ρ_g ($g\ cm^{-3}$)	Porosidade total (%)*	Compactação em RP (MPa)	Condutividade hidráulica ($cm\ s^{-1}$)
Santo Antônio do Amparo	1,39	47,03	2,46	$1,43 \times 10^{-2}$
Elói Mendes	1,25	53,10	2,17	$1,82 \times 10^{-3}$
Campo Belo	1,24	52,07	1,38	$2,62 \times 10^{-2}$

Os valores de densidade estão dentro da faixa sugerida por Dias (1998) que, segundo o autor, a densidade do substrato é uma propriedade utilizada para mostrar as possíveis influências no crescimento de raízes das plantas, as quais, crescem bem em substrato que possui densidade entre $1,1$ a $1,5\ g\ cm^{-3}$, e moderadamente bem com densidade de até $1,7\ g\ cm^{-3}$, sendo, estas as condições para se propor o encerramento de áreas de disposição final, pois o substrato fica favorável para o plantio de espécies rasteiras, com objetivo do rápido recobrimento da área. O aterro controlado do município de Santo Antônio do Amparo apresentou maior densidade, maior compactação e menor volume total de poros, sendo que este apresenta as piores características em relação ao estabelecimento de plantas.

Salienta-se que a densidade aparente é uma das principais características afetadas principalmente, em se pensando em áreas de disposição de resíduos sólidos, devido à compactação exigida pelas normas e tráfego de caminhões e maquinários, corroborando com os dados obtidos por Oliveira et al. (2016), Ralisch et al. (2008) e Magalhães et al (2020) que atribuíram o aumento da densidade do solo ao tráfego de máquinas.

A porosidade média dos substratos dos três depósitos de lixo apresenta uma variação de 47 e 53% conforme evidenciado pelos autores Pinheiro & Mochel, (2018) com a mesma variação. Oliveira et al. (2016) observaram valores de porosidade total de 32,16%, evidenciando um solo menos poroso, que propicia menos infiltração, e consequentemente menor disponibilidade de água para as plantas, aumento de escoamento superficial e intensificação da erosão.

Em relação à resistência a penetração, o solo apresentou-se com alto grau de compactação para os municípios de Santo Antônio do Amparo e

Elói Mendes, já para o município de Campo Belo, o valor foi menor, evidenciando-se que a ADRSU de Campo Belo tem pouca limitação ao crescimento radicular de espécies enquanto cobertura de encerramento da plataforma. Os resultados obtidos no estudo foram inferiores aos obtidos por Oliveira et al. (2016) onde foi observado valor de 3,51, 2,91e 3,15 para as camadas de 0-5cm, 5 – 10 cm e 10 a 20 cm respectivamente. Valores acima de 2 Mpa, segundo Campos et al. (2013) podem ser considerados compactados promovendo restrição significativa ao crescimento radicular de culturas em sistemas de preparo convencional. Analisando-se os dados de densidade do solo e os de compactação notou-se que quanto maior a densidade, maior a compactação e conseqüente queda nos valores de porosidade total, dificultando a aeração e retenção de água, prejudicando o desenvolvimento radicular. Em contrapartida quanto maior a densidade e maior compactação maior será a dificuldade em ocorrer a percolação e menor o risco de se contaminar o lençol freático.

Em relação à condutividade hidráulica do solo das ADRSU, o aterro sanitário situado no município de Campo Belo apresenta uma susceptibilidade maior da infiltração de percolados podendo contaminar solos e águas subterrâneas mais rapidamente, bem como a maior porosidade, porém, o aterro possui infra-estrutura de coleta e tratamento de chorume. Isto se deve ao fato de que o solo coletado nestas áreas é proveniente de áreas de empréstimo, sem nenhuma estrutura definida. Os valores encontrados são caracterizados como elevados e não recomendado por Daniel (1993) para confecção de sistemas de impermeabilização, pois permite alta taxa de infiltração, aumentando assim, o gradiente de pressão no interior da célula que é determinante para o transporte mecânico - advectivo de espécies através de solos.

A norma NBR 13896 (ABNT, 1997) estabelece como condição ideal para a instalação de um aterro, o local que possui coeficiente de permeabilidade de 10^{-6} cm s⁻¹. Porém, são adotadas três faixas de valores para permeabilidade do solo, sugeridos nas normas brasileiras: baixa permeabilidade $K = 10^{-6}$ cm s⁻¹, faixa mediana permeabilidade da ordem de 10^{-4} e 10^{-5} cm s⁻¹ e permeabilidade alta $K = 10^{-3}$ cm s⁻¹. É importante destacar, porém, que a condutividade a qual recomenda a norma é utilizada para impermeabilização do aterro, sendo a mesma influenciada pela compactação. No caso do estudo, foi verificada a condutividade na camada de cobertura final das áreas de disposição de lixo, sendo classificada como permeabilidade alta. Jesus et al. (2013) observou valores variando de $1,1 \times 10^{-4}$ para solos aluviões e de $2,4 \times 10^{-7}$ cm s⁻¹ para solos areníticos, enquanto Oliveira et al. (2016) observaram valores de $1,08 \times 10^{-5}$ cm h⁻¹ na área do Lixão de Humaitá. Matias (2018) avaliou um solo areno-argiloso do aterro de Altinho-PE e verificou que a permeabilidade à água e ao lixiviado foram

semelhantes, da ordem de 10^{-4} cm.s⁻¹ e 10^{-5} cm.s⁻¹, respectivamente. A variação dos valores de condutividade deve-se ao fato de a área apresenta grande variabilidade espacial devido a diferenças de composição destes existentes no solo, devido o mesmo ser constituído muitas das vezes de áreas de empréstimo, conforme observado também por Hurtado (2004).

Quanto aos limites de liquidez e de plasticidade (Tabela 3) o material de cobertura apresentou uma variação de 47,7 a 50,7% e 30,3 a 34,3%, respectivamente.

O substrato, em relação a esse parâmetro de acordo com Tabela 3, para os municípios de Santo Antônio do Amparo e Campo Belo apresenta solos muito compressíveis e altamente plásticos, já para a área de disposição de resíduos sólidos de Elói Mendes apresentou uma classificação como sendo de baixa compressibilidade, porém, trata-se de um solo com baixa resistência podendo se romper mais facilmente com a percolação de líquidos ou ações de forças, ou seja, medianamente plástico.

Tabela 3. Classificação quanto aos Limites de Liquidez e plasticidade das ADRSU.

Município	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação quanto LL	Classificação quanto aos IP**
Santo Antônio do Amparo	50,7	33,7	17	Muito compressíveis	Altamente plástico
Campo Belo	50	30,3	19,7	Muito compressíveis	Altamente plástico
Elói Mendes	47,7	34,3	13,3	Baixa compressibilidade	Medianamente plástico

** Jenkins (Caputo, 1987)

Magalhães et al (2020) observaram os limites de liquidez e plasticidade abaixo dos do presente estudo. Já o limite de liquidez dos estudos de Amadi et al. (2015) teve um valor médio de 51,8%, o que é indicativo de alta plasticidade e baixa condutividade hidráulica, um limite plástico médio de 32,44% e seu índice de plasticidade de 19,37%, o que implica que a argila pode suportar o encolhimento volumétrico na secagem e exibir um potencial de baixo a médio inchaço quando molhado, valores muito próximos ao presente estudo. Segundo Cetesb (1997) sugere que para um solo coesivo ser adequado para uso em aterros sanitários, ele deve apresentar LL maior ou igual a 30% e LP maior ou igual a 15%.

Nas amostras de Campo Belo e Santo Antônio do Amparo, o solo apresentou um índice de plasticidade superior a 15, caracterizando assim condições altamente plásticos, ou seja, estes solos possuem uma maior capacidade de absorver umidade, sem passar do estado plástico para o estado líquido (saturado). Este índice plasticidade

reflete também alta capacidade de bloquear as infiltrações, devido ao baixo índice de vazios, caracterizando solos muito compressíveis. Por se tratar de solos muito compressíveis, são ideais para empreendimentos com necessidade de alta resistência no solo e alta impermeabilidade. Assim, tem-se nestas amostras características favoráveis para confeccionar taludes de aterro, devido à alta compressibilidade (maior resistência ao cisalhamento) e a baixa permeabilidade (ou alta impermeabilidade). Deve se ressaltar que estes solos são das áreas de disposição já encerradas e que, para averiguação da contaminação deve-se levar em consideração às características de condutividade hidráulica e as variáveis químicas a serem avaliadas. Contudo, mesmo o solo apresentando tais características deve ser ressaltado a importância da medição da condutividade hidráulica, que foi maior dentre os solos analisados (Tabela 2) e, conseqüentemente as contaminações do solo, e que, no caso foi

observada à jusante dessa área de disposição final (Tabela 4)

Na ADRSU de Elói Mendes (lixão), o solo apresentou baixa compressividade, tratando-se de um solo com baixa resistência podendo se romper mais facilmente com a percolação de líquidos ou por ações de forças externas resultados aproximados dos de Magalhães et al (2020), o qual constatou ser um solo do tipo arenoso, sendo considerado de baixa resistência à erosão. Reflete-se assim um solo com características desfavoráveis para confeccionar taludes (ausência de resistência ao cisalhamento), ou utilização para disposição final de resíduos sólidos urbanos, pois requer solos com baixa permeabilidade. Quanto ao índice de plasticidade (13,3 plasticidade média) demonstra-se uma média capacidade de bloquear as infiltrações, e que com o maior índice de vazios (baixa compressividade) passa muito rápido de um solo plástico para um solo saturado, favorecendo a infiltração de gases e líquidos como o chorume, levando rapidamente a contaminação local e de lençóis freáticos. Porém ao se relacionar com a

condutividade hidráulica, observaram-se valores de mediana condutividade a permeabilidade alta.

A Tabela 4 apresenta os valores de referência para a concentração de metais pesados para ações de mitigação de acordo com os valores preconizados pela Resolução Conama 420/2009.

Para os municípios de Elói Mendes (0 – 20 cm como na camada de 20 – 40 cm) e Campo Belo (camada de 0 – 20 cm), as variáveis analisadas encontram-se em conformidade com os valores orientadores para solos (Cetesb, 2005), portanto, são classificados como solos limpos não necessitando de ações preventivas para evitar a poluição do solo. Ressalta-se ainda que os valores observados neste trabalho, estão acima dos observados por outros trabalhos em lixões e aterros (Pinto Filho et al., 2012, Melo Junior et al 2015 e Oliveira et al., 2016, Marinho, 2020), o que requer atenção com a qualidade da água subterrânea.

Em contrapartida, na camada de 0-20 cm da área e do entorno do aterro controlado do município de Santo Antônio do Amparo foram observados à jusante valores superiores aos de referência de qualidade para o elemento cobre.

Tabela 4. Valores médios da concentração de metais pesados encontrados na camada de 0-20cm de solos das posições em relação às ADRSU's (montante, aterro e jusante).

		Concentração (mg kg ⁻¹ de peso seco)				
		Montante		Aterro	Jusante	
		Metal Pesado	0-20	20-40	0-20	0-20
Santo Antônio do Amparo	Cu	18,93	17,6	24,67	48,57_Q	611,44_P
	Zn	8,60	7,49	17,34	36,15	42,41
	Cd	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
	Pb	6,86	5,46	6,02	10,12	8,12
	Ni	25,34_Q	16,09_Q	33,36_P	83,00_P	121,57_I
	Cr	128,70_P	116,23_P	173,73_P	377,65_I	530,00_I
	Hg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Campo Belo	Cu	5,13	3,77	9,63	2,90	4,03
	Zn	6,18	3,38	9,14	19,01	29,08
	Cd	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Pb	5,26	5,30	7,01	12,02	13,62
	Ni	2,64	1,23	9,10	4,73	3,88
	Cr	16,05	13,05	21,09	12,43	17,48
	Hg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Elói Mendes	Cu	14,40	11,23	11,03	10,93	9,80
	Zn	6,04	4,73	15,93	7,15	15,00
	Cd	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
	Pb	24,25	16,20	4,10	8,28	7,80
	Ni	7,25	1,54	3,57	3,41	7,49
	Cr	18,01	16,51	20,72	10,85	12,86
	Hg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Valores em negrito e Índices (P, Q, I) sinaliza situações em que os limites foram ultrapassados, P – valores de prevenção, Q – valores de qualidade, I – valores de intervenção.

Para o níquel, a concentração à montante supera o valor de referência de qualidade e no aterro controlado, bem como, à sua jusante supera os valores de prevenção, ocorrendo alterações prejudiciais à qualidade do solo. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos e a qualidade das águas subterrâneas. Para o cromo as concentrações estão acima do limite de prevenção tanto a montante como dentro do aterro, comportamento semelhante ocorre em relação ao níquel dentro do aterro e à jusante. Em relação à concentração de cromo observado a jusante, o mesmo supera os valores de intervenção inferindo que existem riscos potenciais à saúde humana, sendo esta área classificada como contaminada indicando a necessidade de ações para resguardar os receptores de risco. O mesmo observado por Pinheiro & Mochel (2018) e Marques (2011), indicando que os metais pesados possuem capacidade de recalcitrância e, portanto, podem ser cumulativos no ambiente. Adamcová et al, (2016) observaram valores altos em seu estudo para Cr, Cu e Ni, porém ainda mais baixos em relação ao presente estudo. Entretanto, os resultados foram maiores aos observados por Magalhães et al (2020) à exceção do chumbo e níquel, estudando as camadas de encerramento no aterro sanitário de Belo Horizonte – MG, bem como maiores às altas concentrações de Cr e Cu nos estudos de Krčmar et al (2018). Porém, resultados contrários do presente estudo aos dos dados obtidos por Oliveira (2019) avaliando as concentrações de Pb, Cu e Zn no aterro sanitário de Januária - MG. Assim, pode-se ainda inferir que a disposição de resíduos sólidos no aterro controlado contribui para a contaminação em áreas de jusante, corroborando com os valores de condutividade

hidráulica (Tabela 3), que possivelmente contribui significativamente para as concentrações elevadas nas áreas de jusante. Embora o aterro controlado apresente menor porosidade e condutividade hidráulica em com comparação com o aterro sanitário, a contaminação nas áreas de jusante pode ser explicada devido à topografia do terreno, sendo esse aterro é caracterizado como aterro de encosta.

Com base no teste estatístico de T (Tabela 5), foi observado que o fator posição de amostragem, nos municípios de Elói Mendes e Santo Antônio do Amparo não apresentou diferença estatística, porém, principalmente no município de Santo Antônio do Amparo, os elementos cromo e níquel apresentaram coeficiente de variação (CV - %) de 83 e 82 respectivamente, sinalizando uma elevada variabilidade espacial. Já para o município de Campo Belo houve diferença significativa entre a posição montante e aterro, podendo inferir que a área de disposição final sofre influência.

Mesmo não havendo diferença significativa (Tabela 05), para a área de Santo de Antônio do Amparo observou-se que há um aumento dos elementos, principalmente níquel, cobre e cromo, o que permite inferir que o aterro contribuiu com um leve aumento desses elementos à jusante, já que os mesmos são considerados acumulativos. Observou-se que as concentrações a jusante das áreas de disposição de resíduos estão relativamente mais altas sugerindo que possivelmente esses metais tenham maior facilidade de percolação, principalmente ao se comparar com a maior condutividade hidráulica do solo, esta condição sinaliza a necessidade da continuidade do monitoramento, para confirmar esta tendência, e conseqüentemente a indicação de medidas cautelares ou corretivas.

Tabela 5. Resultados do teste T aplicados às matrizes montante, área de disposição e jusante das ADRSU's

	TESTE T		
	Montante - aterro	Aterro – jusante	Montante - jusante
Campo Belo	0,016	0,638	0,203
Elói Mendes	0,578	0,828	0,445
Santo Antônio do Amparo	0,172	0,174	0,173

Conclusões

Não foi possível detectar contaminações por metais pesados nas ADRSU's de Campo Belo e Elói Mendes, entretanto em Campo Belo há uma sinalização de que com o tempo esta condição poderá se confirmar, apresentando uma

susceptibilidade maior da infiltração de percolados podendo contaminar solos e águas subterrâneas mais rapidamente, requerendo um monitoramento contínuo.

Observou-se contaminação nas áreas de montante do aterro controlado níquel e cromo, porém, essa ADRSU exerce influência na

acentuação da contaminação em áreas a jusante, principalmente níquel, cobre e cromo.

O aterro controlado do município de Santo Antônio do Amparo apresentou maior densidade, maior compactação e menor volume total de poros, sendo que este apresenta as piores características em relação ao estabelecimento de plantas.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Convênio n.º 2091010200509, firmado entre a Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM e Fundação de Desenvolvimento Científico e Cultural (FUNDECC) com a execução da Universidade Federal de Lavras – UFLA.

Referências

- Abnt - Associação Brasileira De Normas Técnicas. 1984. NBR 7180: Limite de plasticidade, Rio de Janeiro, _____; NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1984. _____, NBR13896: Aterros de resíduos não-perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação, Rio de Janeiro, 1997.
- Aguiar, E. S., Ribeiro, M. M., Viana, J. H., & Pontes, A. N. (2021). Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 13, e20190263. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20190263>
- Adamcová, D., Vavřková, M., Bartoň, S., Havlíček, Z. E Břoušková, E .2016: Soil contamination in landfills: a case study of a landfill in Czech Republic, *Solid Earth*, 7, 239 – 247, Disponível: <https://doi.org/10.5194/se-7-239-2016>.
- Adelopo, A.O., P.I. Haris, B.I. Alo, K. Huddersman, R.O. Jenkins. 2018. Multivariate analysis of the effects of age, particle size and landfill depth on heavy metals pollution content of closed and active landfill precursors. *Waste Management*, [s.l.], v. 78, p. 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.040>.
- Amadi A. N., Okunlola I. A., EZE C. J., Jimoh M. O., Unuevho C. I., Abubakar Fahad. 2015. Geotechnical Assessment of Clay Deposits in Minna, North-Central Nigeria for Use as liners in Sanitary Landfill Design and Construction. *American Journal of Environmental Protection*.; 3, (3) 67-75, Disponível: <https://doi.org/10.12691/env-3-3-2>.
- Apha standard methods: for examination of water and wastewater. 23th ed. Baltimore: APHA, AWWA, WPCP, 2017.
- Astm D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Caputo, H.P. 1987. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 219p.
- Castilho Júnior, A. B (Coord.). 2006. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com Ênfase na preservação de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 494 p.
- Campos, M. C. C., Aquino, R. E., Oliveira, I. A. O., Bergamim, A. C. 2013. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 8, 2, 305-310. Disponível: <https://doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2091>
- Companhia De Tecnologia De Saneamento Ambiental. 2005. Valores orientadores para solo e água subterrânea. São Paulo.
- Conselho Nacional Do Meio Ambiente. Resolução 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas." Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>.
- Daniel, D. E. 1993. Geotechnical practice for waste disposal. London: Chapman and Hall. 683 p.
- Dias, L. E.. 1998. Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas. p. 27-44. In Dias, L. E., Mello, J. W. V. (Ed.). *Recuperação de áreas degradadas*. UFV, Departamento de Solos; Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Viçosa, Minas Gerais. 251 p.
- Embrapa. 1997. Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA/CNPQ. Rio de Janeiro. 2ed., 212p.
- Faria, G. M.; Mondelli, G. 2018. Proposal for MSW contaminant classification applied to a tropical aquifer. *Environmental Science and Pollution Research*. 25, (10) 9771–9796. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1046-3>
- Faria, G.M.M., Mondelli, G. 2017. Interaction between municipal solid waste leachate and

- Bauru aquifer system: a study case in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 24, (35) 27553–27572. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0115-y>
- Feam - Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2008. Orientações Técnicas para Atendimento da Deliberação Normativa 118/2008 do Conselho Estadual de Política Ambiental / Fundação Estadual do Meio Ambiente, - Belo Horizonte: Feam, 48 p.; il.
- Ganiyu, SA, Badmus, BS, Oladunjoye, M., Aizebeokhai, AP, Ozebo, VC, Idowu, OA, & Olurin, OT (2016). Assessment of groundwater contamination around active dumpsite in Ibadan southwestern Nigeria using integrated electrical resistivity and hydrochemical methods. *Environ Earth Sci* .75, 643. P. 1-19. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5463-2>
- Giang, N.V., Kochanek, K., Vu, N.T. et al. 2018. Landfill leachate assessment by hydrological and geophysical data: case study NamSon, Hanoi, Vietnam. *Journal Mater Cycles Waste Manag*, 20, 1648–1662. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0732-7>
- Gómez-Puentes, F. J., Reyes-López, J. A., López, D. L., Carreón-Díazconti, C., Belmonte-Jiménez, S 2014. Geochemical processes controlling the groundwater transport of contaminants released by a dump in an arid region of México. *Environmental Earth Sciences*. 71, 609-621. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2456-2>
- Herrero, M. 2020. Human exposure to trace elements and PCDD/Fs around hazardous waste landfill in Catalonia (Spain). *Science of the total Environment*, [s.1.], v. 710, p. 136313-136324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136313
- Hurtado, A, L, B. 2004. Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial , Piracicaba, 94 p, Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- Jesus, L. S. Fernandes, J. B., Giacheti, H. L. 2013. Investigação da condutividade hidráulica dos solos de uma área de aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de campo e laboratório. *Ciência & Engenharia*. 22 , (1) 21 – 28.
- Krčmar D, Tenodi S, Grba N, Kerkez D, Watson M, Rončević S, Dalmacija B. 2018. Preremediação assessment of the municipal landfill pollution impact on soil and shallow groundwater in Subotica, Serbia. *Sci Total Environ*. v. 15; n.615, p.1341-1354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>.
- Kemerich, P. D.C; Flores, C. E.;Borba, W. F.; Flores, B. A.; Vicatto Filho, L. L. D.; Barros, G.; Gerhardt, A. E.; Rodrigues, A. C. 2013. Variação espacial das concentrações de cádmio e manganês em solo ocupado por aterro sanitário. *Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas – UFSM*. 17, 17, 3336 – 3345. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5902/2236117010663>
- Londe, P. R.; Bitar, N. A. B. 2011. Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas (MG). *Perquirere*, 8, 224-249.
- Magalhães, A. F.; Lopes, S. R.; Soares, B. L.; Carvalho, J. A.; Simões, G. F. 2020. Cobertura final de aterros sanitários: uma abordagem conservacionista ambiental. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. V. 13, n. 3, p. 669-681. <http://dx.doi.org/1022201/iingen.0718378xe.2020.13.3.63794>.
- Magalhães, A. F. 2005. Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso para o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG. 169 f. Dissertação (Mestrado em-Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Marinho, A. P. F. 2020. Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos na qualidade de solos das regiões tropical úmida e semárida potiguar. 44f. Dissertação (mestrado em Engenharia sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- Marques, R. F. P. V.; Silva, A. M.; Rodrigues, L. S.; Coelho, G. 2012. Impacts of urban solid waste disposal on the quality of surface water in three cities of Minas Gerais - Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 36, 6, 684-692. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000600010>.
- Marques, R. F. P. V. (2011) Impactos ambientais da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo e na água superficial em três municípios de Minas Gerais. 95f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Matias, G. A. (2018) Refuncionalização de solo contaminado por resíduos sólidos urbanos em áreas de aterro sanitário. Tese de doutorado do curso de Geotecnia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, 116 p.

- Melo JR, J. C., Amorim, M., Seberino, A., Oliveira, T., Barros, V. 2015. Diversidade e estrutura comunitária da vegetação em regeneração natural em uma área de lixão desativado *Acta Biologica Catarinense*. 2. 32-47. Disponível: <https://doi.org/10.21726/abc.v2i1.153>.
- Mondelli, G, Giacheti, H. L. Hamda, J. 2016. Avaliação da contaminação no entorno de um aterro de resíduos sólidos urbanos com base em resultados de poços de monitoramento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. 21, (1) 169-182. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100120706>
- Ojuri, O. O.; Ayodele, F. O. Oluwatuyi, O. E. 2018. Risk assessment and reabilitaton potential of a millennium city dumpsite in Sub-Saharan Africa. *Waste Management*, [s.1.], 76, 621-628. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.002>.
- Oliveira, J. A. M.; Medeiros, P. C.; Oliveira, C. M. M.; Santos, A. F. S.; Ribeiro, D. P. 2019. Níveis de contaminação por metais pesados na área de disposição de resíduos sólidos no município de Januária-MG. *R. gest. sust. ambient., Florianópolis*, v. 8, n. 1, p.629-640. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e12019629-640>
- Oliveira, B. O. S.; Tucci, C. A. F., Neves Júnior, A. F.; Santos, A. A. 2016. Avaliação dos solos e das águas nas áreas de influência de disposição de resíduos sólidos urbanos de Humaitá, Amazonas. *Engenharia Ambiental e sanitária*. 21, (3) 593-601. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016133274>.
- Pinheiro, N. C. A.; Mochel, F. R. 2018. Diagnóstico de áreas contaminadas pela disposição final de resíduos sólidos no município de Paço do Lumiar (MA). *Edngenharia Sanitária e Ambiental*. 23, n1173-1184. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152201811731184>
- Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018173619>
- Pinto Filho, J.L.O.; Souza, M.J.J.B.; Santos, E.G.; Gê, D.R.F.; Cesar Filho, P. 2012. Monitoramento dos teores totais e disponíveis de metais pesados no lixão do município de Apodi-RN. *Revista Verde*, 7, 1, 141-147.
- Ralisch, R.; Miranda, T.M.; Okumura, R.S.; Barbosa, G.M.C.; Guimarães, M.F.; Scopel, E.; Balbino, L.C. 2008. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 4, 381-384. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400008>
- Tenodi S, Krčmar D, Agbaba J, Zrnić K, Radenović M, Ubavin D, Dalmacija B. Assessment of the environmental impact of sanitary and unsanitary parts of a municipal solid waste landfill. *Journal of Environmental Management*, [s.1.], 258, 110019-110029. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110019>
- Silva, T. A. C., Melloni, R; Melloni, E. G. P., Ramos, P. P., Pereira, J. M. 2020. Avaliação da qualidade de solo de área de lixão desativado: uma revisão de Literatura. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 2, 630-640.
- United States Environmental Protection Agency. Method 3051 A: microwave assisted acid digestion of sediment, sledges, soils, and oils. Washington, 1998. Disponível em: <[http://www.epa.gov/SW-846/3051^a.pdf](http://www.epa.gov/SW-846/3051a.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2016.