

Desempenho dos leitos de secagem na desidratação de lamas fecais no município de Chimoio (Moçambique)

Jenita Benício Cangola^{1*}, Júlia Gaspar Silota², Roberto Justino Chuquela³, Luís Cristóvão⁴,

¹Mestrado em Engenharia Ambiental e dos Recursos Naturais, Universidade Zambeze, Moçambique. (*Autor correspondente: cangolaj@gmail.com)

²Mestrado em Engenharia Ambiental e dos Recursos Naturais, Universidade Zambeze, Moçambique

³Mestrado em Engenharia de Construções Rurais e Ordenamento do Território, Universidade Zambeze, Moçambique

⁴Doutorado em Engenharia Mecânica, Professor na Faculdade de Engenharia Ambiental e dos recursos Naturais, Universidade Zambeze, Moçambique

Histórico do Artigo: Submetido em: 12/09/2021 – Revisado em: 04/03/2022 – Aceito em: 02/05/2022

RESUMO

A aplicação de Leitos de Secagem (LS) para a desidratação de lamas fecais é uma das soluções tecnológicas simples e acessível em termos de custos, operação e manutenção. Nos países em franco desenvolvimento, como Moçambique, esta tecnologia representa uma das principais alternativas para o tratamento de águas residuais domésticas, sobretudo em áreas que dependem exclusivamente de sistemas de sanamento local e utilizam infraestruturas como fossas sépticas e latrinas isoladas. Dada a importância desta tecnologia, neste estudo são apresentados os principais aspectos do seu desempenho na secagem de lamas, e o seu propósito incide na análise dos efeitos proporcionados pelos principais factores que condicionam as taxas de drenagem e evaporação da água existente nas lamas (nomeadamente a variedade de lamas aplicadas, concentração inicial de sólidos totais, condições climáticas e a profundidade/espessura de lamas aplicadas nos leitos). Para tal, as experiências foram realizadas à escala piloto, numa instalação totalmente exposta as adversidades climáticas da região. Os resultados indicam que valores altos de precipitação, humidade relativa, assim como aplicação de lamas fecais não estabilizadas afectam a drenagem da massa líquida e negativamente na secagem das lamas fecais nos LS.

Palavras-Chaves: Leitos de Secagem, Desempenho operacional, Lamas fecais.

Performance of drying beds in faecal sludge dewatering in the Chimoio municipality (Mozambique)

ABSTRACT

Application of Drying Beds for the faecal sludge dewatering is one simple and accessible technological solution in terms of costs, operation and maintenance. In developing countries such as Mozambique, this technology represents one of the main alternatives for domestic wastewater treatment, especially in areas that depend exclusively on on-site sanitation systems and use infrastructures such as septic tanks and isolated latrines. Given the importance of this technology, this study presents the main aspects of its performance in sludge drying and its purpose focuses on the analysis of the effects provided by the main factors that affect the drainage and evaporation rates of the water existing in the sludge (namely the variety of applied sludges, initial concentration of total solids, climatic conditions and depth/thickness of sludge applied in the beds). To this end, the experiments were carried out on a pilot scale, in an installation fully exposed to the region's adverse climatic conditions. The results indicate that high values of precipitation, relative humidity, as well as application of unstabilized faecal sludge, affect the liquid mass drainage and negatively in the drying of the faecal sludge in the drying beds.

Keywords: Drying beds, Operational performance, Faecal sludge

Cangola, J., Silota, J., Chuquela, R., Cristóvão, L. (2022). Desempenho dos leitos de secagem na desidratação de lamas fecais no município de Chimoio (Moçambique). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.10, n.3, p.17-31.



1. Introdução

Segundo a WHO/UNICEF (2015), a procura pelos serviços de saneamento aumenta significativamente, particularmente nos países em desenvolvimento. Moiambo et al. (2020) refere que para o caso de Moçambique, este facto é justificado pela necessidade de melhorar os sistemas sanitários sobretudo nas zonas urbanas e pelo aumento significativo da densidade populacional. A par disto, os sistemas *in situ* de saneamento são os mais elegíveis e usuais, pois, são acessíveis quando comparado com os sistemas centralizados e, se aplicados de forma adequada garantem condições seguras de salubridade. Para Pinto et al. (2014) estes sistemas consideram a combinação integrada de factores como a forma através da qual a população tem acesso (interface), a recolha, o armazenamento, o transporte, o tratamento e o destino final dos produtos resultantes do uso da interface. Destes factores, o tratamento representa uma etapa crucial, responsável pela redução e/ou remoção dos patógenos presentes nos resíduos provenientes das etapas prévias, assim como a redução do volume inicial. A escolha do tipo e/ou tecnologia de tratamento à aplicar está relacionada com as intenções de deposição final ou reaproveitamento dos resíduos.

Segundo Moiambo et al. (2020), são frequentes as propostas de utilização de leitos de secagem para a desidratação de lamas fecais porque se ajusta a realidade dos países em desenvolvimento, em termos técnicos, económicos e sócio-ambientais. Refere ainda que a desidratação das lamas fecais ocorre através da separação sólido-líquido (drenagem gravítica da água livre através da camada filtrante) e da evaporação da água adsorvida e/ou capilar.

Semiyaga et al. (2018) afirma que as lamas fecais contém mais de 90% de água e portanto, a desidratação reduz os custos de transporte, facilita o tratamento local e o uso final, principalmente em favelas urbanas. Neste âmbito, realizou um estudo com objectivo de melhorar o processo de desidratação e o uso final de lamas fecais por condicionamento com serragem e pó de carvão. Os resultados mostraram melhorias do processo de desidratação de lamas fecais na ordem de 14.3 a 35.7%, bem como o aumento do poder calorífico das lamas desidratadas. Os autores recomendam o tratamento de lamas fecais pela sua importância na salubridade ambiental, principalmente nas favelas urbanas dos países de baixa renda.

Outro estudo foi desenvolvido por Tamakloe (2014), que caracterizou as lamas fecais de diferentes origens produzidas na cidade de Kumasi, em Gana, como propósito de analisar a viabilidade de produção de biodiesel. Gold et al. (2018) analisaram o processo de desidratação de lamas fecais, numa abordagem “*cross-country*” que integrava países como Uganda, Japão, Vietname e Suíça, com o propósito de avaliar as características influentes do processo e comparar o desempenho da desidratação de lamas fecais com lamas de estações de tratamento de águas residuais. Os resultados revelaram-se importantes para a identificação de características potenciais que podem explicar e prever a alta variabilidade do desempenho da desidratação de lamas fecais em diferentes condições. Importa também mencionar os trabalhos realizados por Kuffour et al. (2013), Schoebitz et al. (2014) e Sonko et al. (2014), que de forma geral caracterizaram as lamas fecais de diferentes origens e estudaram as condições para o melhor desempenho operacional de leitos de secagem em realidades específicas.

Entretanto, apesar do crescente interesse de pesquisa nesta área, ainda é importante considerar o ponto de vista de Koné e Strauss (2004) que, referem que a desidratação de lamas fecais em leitos de secagem ainda é pouco explorado, havendo muitas limitações de conhecimento, experiência, principalmente quando se trata da variação do desempenho em função do local específico de aplicação.

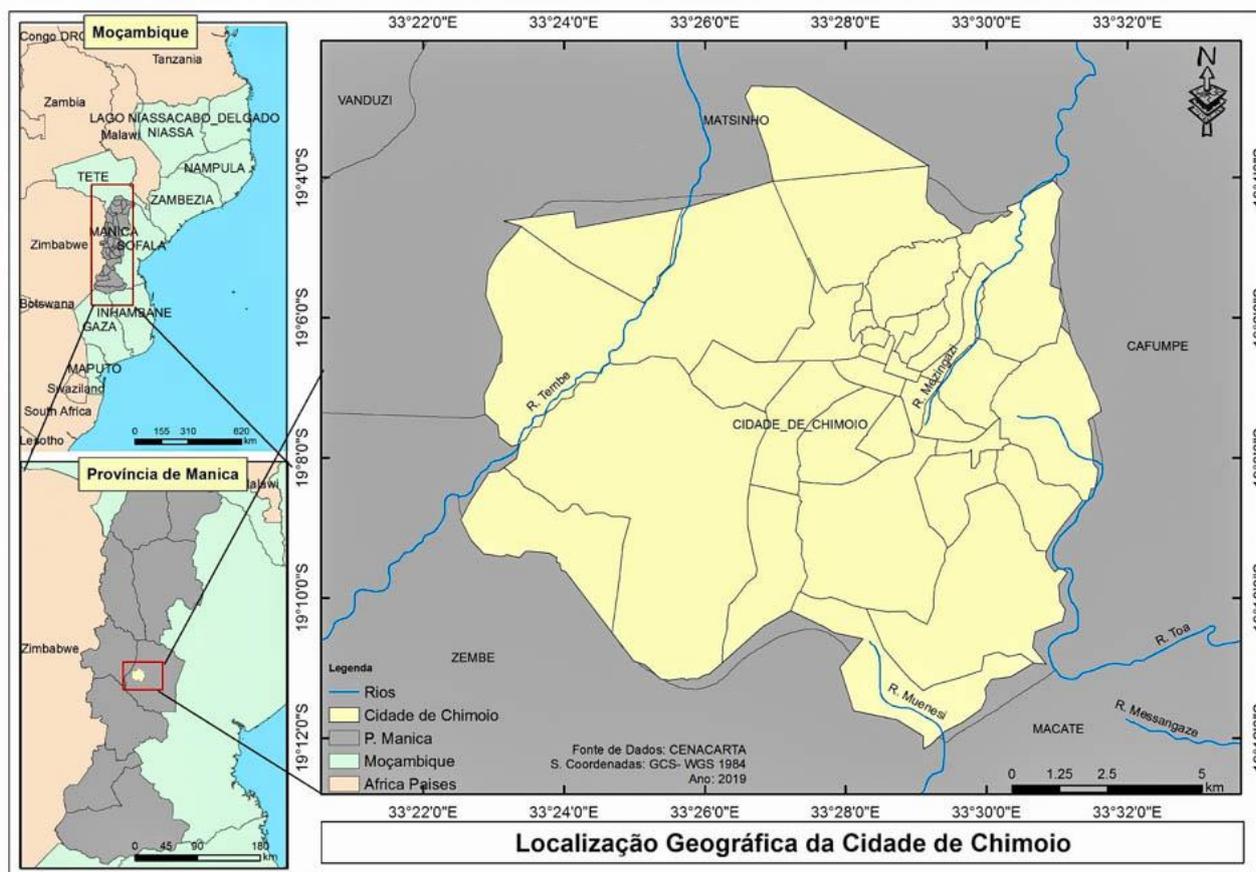
Assim sendo, o objectivo deste trabalho consiste em avaliar o desempenho desta tecnologia (LS) na desidratação de lamas fecais, considerando as condições climáticas do Município de Chimoio, assim como as características específicas das lamas fecais geradas pela população local.

2. Material e Métodos

2.1. Aspectos climáticos da área de estudo

O Município de Chimoio situa-se na região central de Moçambique e é constituído por quatro agrupamentos de zonas, nomeadamente: Zona Urbana, Zona Peri-urbana, Zona Peri-urbana Rural e Zona Peri-urbana Rural Mista, que albergam os trinta e três bairros existentes (INE, 2019). Segundo o Ministério de Administração Estatal (2002), o município é capital da Província de Manica, situada a 33° 30'E no Corredor da Beira, a cerca de 200 quilómetros da cidade da Beira e a 100 quilómetros da fronteira com o Zimbabwe. Na Figura 1 é apresentado o mapa de enquadramento geográfico da área de estudo.

Figura 1: Localização Geográfica do Município de Chimoio



Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com o Instituto Nacional de Estatísticas, Chimoio tem uma população total de cerca de 363.336 habitantes (actualizada no censo de 2017), dos quais o grosso número são residentes da zona peri-urbana, predominantemente caracterizada pela ocupação espontânea, residências maioritariamente precárias e deficiência dos serviços de saneamento básico (INE, 2019).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima é do tipo Temperado Húmido com Inverno Seco e Verão Quente, caracterizado por temperatura e precipitação média anual na ordem dos 21.5°C e 143 mm, respectivamente. A estação chuvosa decorre entre Novembro e Março, sendo Dezembro, Janeiro e Fevereiro os meses de maior precipitação, atingindo o pico em Janeiro, com precipitação média de 231 mm. Entre Abril e Setembro, a precipitação é muito reduzida, com valores médios mensais na ordem dos 20 mm (Kottek et al., 2006 e Harrison et al., 2011). O Instituto Nacional de Meteorologia considera que a região tem variação sazonal extrema na sensação de humidade, pois, o período mais abafado do ano dura 6.4 meses, e se estende

de Outubro a Abril, no qual o nível de conforto é abafado, opressivo ou extremamente húmido, ao menos 22% do tempo. A velocidade horária média do vento passa por variações sazonais pequenas e a época de mais ventos no ano dura entre Agosto e Novembro, com velocidades médias de 11.3 Km/hora (INAM, 2019).

De acordo com United Nations Development Programme (2010), são claros os efeitos das mudanças climáticas na região, verificando-se um aumento das temperaturas mínima e máxima e redução da precipitação média anual. Segundo o autor, nas últimas quatro décadas registou-se um aumento de chuvas fortes, a uma taxa média de 2,6% e um aumento dos máximos anuais de cinco dias de chuva em 8,4 mm por década, com maiores acréscimos na estação chuvosa.

2.2. Descrição da instalação experimental

A constituição da Instalação Piloto de Desidratação de Lamas Fecais, designado abreviadamente por IPDLF, foi inspirada no modelo utilizado por Moiambo et al. (2019), no seu estudo sobre Modelação da drenagem em leitos de secagem de lamas, realizado na província de Tete, em Moçambique. Construída numa área de aproximadamente 56m², os leitos de secagem foram assentes sobre bases de alvenaria de aproximadamente 0.4m de altura, com referência ao solo, e um mínimo de 1% de inclinação para induzir a drenagem da componente líquida, como ilustra a Figura 2.

Cada unidade de leito de secagem continha na sua estrutura uma camada filtrante de 0.4m de espessura, constituído por pedra e areia. Autores como Seck et al. (2014) e Dingamnyelli (2014), recomendaram as características ideais para composição do filtro, e, com base nisto foram definidos 0.1m de camada de areia (ϕ efectivo de 0.3-0.6mm), 0.1m de camada de pedra do tipo brita 1 (ϕ efectivo de 9.5-19 mm) e 0.2m de camada de pedra do tipo brita 2 (ϕ efectivo de 19-25mm).

Figura 2: Instalação Piloto de Desidratação de Lamas Fecais (IPDLF)



Fonte: Elaborado pelo Autor

2.3. Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais de desidratação de lamas fecais decorreram entre os meses de Julho e Dezembro de 2019 com vista a abranger a estação seca e chuvosa daquela região. O enchimento dos leitos de secagem com lamas fecais foi antecedido de ensaios hidráulicos do filtro, partindo do pressuposto que o comportamento da drenagem é determinada pela condutividade hidráulica saturada e porosidade/cedência específica.

A determinação da condutividade hidráulica saturada foi baseada no princípio de ensaio à carga constante, em que, foi efectuado o enchimento dos leitos com água corrente até atingir um determinado nível N e em seguida drenada a água através do dispositivo de drenagem localizada na parte inferior do leito, variando a altura H do sifão de descarga. A água drenada foi colectada por um período de tempo e controlado seu volume total. O ensaio foi repetido com variações de N_i e H_i , à carga constante e condutividade hidráulica determinada por rearranjo da equação de Darcy.

A porosidade também foi determinada através dos mesmos fundamentos e consistiu na saturação da camada filtrante, isto é, enchimento de cada leito com água até atingir um nível constante no topo do filtro ($N=0.4\text{m}$). Em seguida, por meio das válvulas de descarga existente na parte inferior do tanque (que compõe o leito), descarregou-se a água inserida, registando o volume descarregado. Para evitar a evaporação da água, os leitos fora encobertos e, a colecta e quantificação da água foi prolongada por cerca de 5 a 7 dias até não se registar nenhum escoamento gravítico. A porosidade foi estimada com base na equação 1:

$$n_e = \frac{v_{pa}}{v_t} * 100\% \quad (1)$$

Onde, n_e representa a porosidade inicial do leito (%); v_{pa} é o volume de água descarregado (m^3) e v_t é o volume total ocupado pelo filtro, em m^3 .

Após a realização dos ensaios hidráulicos procedeu-se a realização dos ciclos experimentais de desidratação das lamas fecais, que consistiram no enchimento dos leitos de secagem e acompanhamento da desidratação até ao ponto de retirada das lamas com concentração de sólidos desejável. Foram realizados dois ciclos experimentais, dos quais um no período de escasses de chuva, entre 4 a 25 de Julho, e o outro no período caracterizado pela ocorrência de chuvas, entre 7 de Novembro a 16 de Dezembro de 2019. Em ambos casos foram utilizadas lamas fecais das latrinas, fossa séptica individual e balneário público. A colecta das lamas na origem foi efectuada através de operadores locais que prestam serviços de esvaziamento de fossas, latrinas e transporte dos respectivos resíduos.

Inicialmente foram estudados três leitos de secagem, abastecidos por lamas de balneário público, em espessuras que variam entre 0.35m e 0.43m. Diferente do primeiro, no segundo ciclo foram utilizadas lamas oriundas de fossas sépticas e latrinas individuais em espessuras que variam entre 0.35m e 0.40m. Sem nenhum tipo de acondicionamento químico, as lamas foram retiradas da origem e transportadas para os leitos com auxílio de mangueiras acopladas ao camião vácuo que geralmente são utilizados pelos operadores.

Durante o enchimento dos leitos, a pressão da mangueira de descarga foi ajustada e adicionalmente utilizado um objecto de forma oblíqua à direcção do jacto de descarga com vista a diminuir a pressão sobre o filtro evitar a sua danificação. No decorrer deste processo, as válvulas do orifício de descarga permaneceram fechadas e a secagem foi dada como iniciada logo após a sua abertura. O acompanhamento da desidratação consistiu fundamentalmente na verificação do progresso da concentração de sólidos nos leitos e dos factores intervenientes como precipitação e temperatura.

3. Resultados e Discussão

3.1. Comportamento das variáveis climáticas de interesse na área de estudo

Para além da importante influência que representam na desidratação de lamas fecais, variáveis climáticas, nomeadamente, temperatura, precipitação, humidade relativa, velocidade do vento e radiação solar relacionam-se entre si. A radiação solar é a principal responsável pela variação da temperatura do ar e a precipitação afecta, naturalmente, a humidade relativa. Tal como expectável, o 1º ciclo de secagem foi caracterizado por temperaturas amenas, com média de cerca de 18.4 °C e variação máxima e mínima de 24.6 e 11.8 °C respectivamente, enquadrando-se na estação seca (mês de Julho). Diferente do primeiro, no 2º ciclo foram registados valores elevados de temperatura, com a média em cerca de 32.6 °C, a máxima de 40 °C e mínima de 27 °C, correspondendo assim as variações típicas da estação chuvosa do local.

Pela exposição a que os leitos estavam sujeitos, a variação da temperatura do ar interferiu consideravelmente na variação da temperatura das lamas. Ora vejamos, a média da temperatura das lamas no 1.º ciclo foi de 19,8 °C e no 2.º ciclo de 28,4 °C, equiparando-se às temperaturas médias das duas estações em que os ciclos de secagem decorreram. Segundo Medeiros (2002), a temperatura do ar interfere na endotérmica da matéria exposta, e, quanto maior for a temperatura e superfície de contacto, maior será a intensidade da evaporação. Assim sendo, o 2.º ciclo de secagem apresenta, à partida, as condições mais favoráveis de temperatura para o bom desempenho dos leitos de secagem.

No que concerne a precipitação da chuva, não houve registo deste evento no primeiro ciclo e no segundo ciclo de secagem ocorreu numa média diária de 7.1 mm. A velocidade do vento registrada no primeiro ciclo foi superior ao do segundo, com valores de 131.9m/s e 2.2 m/s respectivamente. Com ligeira diferença, os resultados da humidade relativa foram elevados no primeiro ciclo, 68% e observados 53.4% no segundo ciclo. Observa-se que, apesar de temperatura e radiação solar relativamente baixas, a ausência de chuvas associada a velocidade do vento observadas no 1.º ciclo, favoreceram a remoção da massa líquida das lamas fecais. As correlações entre as variáveis dificulta a definição dos efeitos separados de cada uma sobre a taxa de desidratação, por isso, para avaliação foram agregados outros factores como a capacidade de drenagem e a evolução da concentração de sólidos totais.

3.2. Condutividade hidráulica nos leitos de secagem

Realizado os ensaios experimentais de porosidade inicial, os resultados são representados pela média global de 35.41%, com variação entre 31.08% a 42.10%. Considerando o efeito directo dos valores estimados em cada leito, observa-se que há homogeneidade nos arranjos das estruturas do filtro, com dispersão de 3,6% dos valores médios isolados em relação a média global. A porosidade do filtro tende a reduzir conforme o período de utilização do mesmo e, segundo Tanner e Sukias (1995) é justificado pelo facto dos interstícios armazenar flocos coagulados e, quanto mais flocos são depositados, mais acentuada se torna a redução da carga de drenagem. Por essa razão, recomenda-se a renovação dos filtros antes da sua utilização e/ou enchimento dos leitos de secagem.

Os resultados referente a forma como a massa líquida é conduzida na camada filtrante indicam uma condutividade hidráulica média global de 9.4×10^{-5} m/s e desvio padrão de 8.37×10^{-6} . Assim, como se observa na Tabela 1, há forte condensação dos dados, indicando o comportamento similar em todos leitos de secagem.

Tabela 1 – Variação da Condutividade Hidráulica Saturada dos leitos de secagem

	Valor médio	Desvio Padrão	Valor máximo	Valor mínimo
Leito de Secagem 1	1.1×10^{-4}	1.9×10^{-5}	1.7×10^{-4}	8.0×10^{-5}
Leito de Secagem 2	8.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}	5.0×10^{-5}
Leito de Secagem 3	8.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.5×10^{-4}	6.0×10^{-5}
Leito de Secagem 4	9.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.5×10^{-4}	7.0×10^{-5}
Leito de Secagem 5	7.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-4}	6.0×10^{-5}
Leito de Secagem 6	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}	1.7×10^{-4}	7.0×10^{-5}
Leito de Secagem 7	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}	1.7×10^{-4}	8.0×10^{-5}
Leito de Secagem 8	1.2×10^{-4}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}

Fonte: Elaborado pelo Autor

A variação da porosidade determinou as condições de condutividade hidráulica, isto é, quanto maior a porosidade, o transporte da água teve lugar com maior velocidade e vice-versa.

Tendo em conta que foi considerada a uniformidade na composição do filtro em todos os leitos de secagem, no era expectável a variação da condutividade hidráulica, assim como da porosidade. Apesar da variação não significativa, na ordem de décimas, os leitos de secagem 1,6,7 e 8 apresentaram valores superiores. Este facto pode ter ocorrido em razão da existência de granulados de areia e pedra relativamente superiores na composição do filtro. Segundo Pinheiro et al. (2017), existe correlação entre o tamanho da partícula e a condutividade hidráulica. As experiências por eles realizadas revelam a redução do valor da

condutividade hidráulica com a elevação da percentagem de partículas finas, e da mesma forma ocorre um acréscimo da condutividade com o aumento da fracção na granulometria. Botari e Bernardo (2009) também constataram que a granulometria é um dos factores que influencia na forma de condução da água no filtro, bem como na sua perda de carga.

Outro aspecto que também pode justificar esta variação foi a inexistência de um mecanismo que permitisse garantir com rigor a aplicação do caudal de enchimento exatamente igual ao caudal de descarga. Pinheiro et al. (2017) na sua abordagem também afirma que nos ensaios de carga constante, a carga hidráulica deve ser mantida sem variação.

3.3. Caracterização preliminar das lamas fecais

Para o estudo foram utilizadas lamas fecais com características diferentes, tal como expressa a Tabela 2, e estas características foram influenciadas por vários factores de ordem sociais e de construção, a destacar a infraestrutura. Apesar das diferentes composições, foi notável a existência de resíduos sólidos como garrafas plásticas, trapos, sacos plásticos, pensos higiénicos etc, em lamas fecais descarregadas nos leitos de secagem. Esta situação é o reflexo da fragilidade dos sistemas de gestão dos resíduos sólidos, principalmente nos bairros periféricos onde é comum o uso de fossas sépticas e latrinas isoladas.

Durante o enchimento dos leitos de secagem nº1 e nº5, do 2º ciclo experimental, a pressão exercida pela mangueira de descarga causou a ruptura das camadas filtrantes, permitindo a passagem directa das lamas para os recipientes de colecta de águas residuais. Diante deste facto, estes leitos foram desactivados e nenhum dado foi incluído no estudo.

Tabela 2 – Características preliminares das lamas fecais

Parâmetros	1º Ciclo experimental			2º Ciclo Experimental					
	LS1	LS2	LS3	LS2	LS3	LS4	LS6	LS7	LS8
Origem	BP	BP	BP	FS	LT	LT	FS	LT	LT
ST (%)	3.0	3.0	4.0	5.5	6.7	24.5	3.9	3.6	23.1
T^a	22.1	22.7	22.0	27.2	28.6	29.7	26.8	28.2	28.9
Cor	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza	Verde claro	Verde Escuro	Cinza	Verde escuro	Verde Escuro
Textura	Lqd	Lqd.	Lqd.	Past.	Past.	Past.	Lqd.	Past.	Past.

Past.-Pastosa ; Lqd.- líquida; BP-Balneário público; FS-fossa séptica; LT-latrinas; LS-leito de secagem

Fonte: laborado pelo Autor

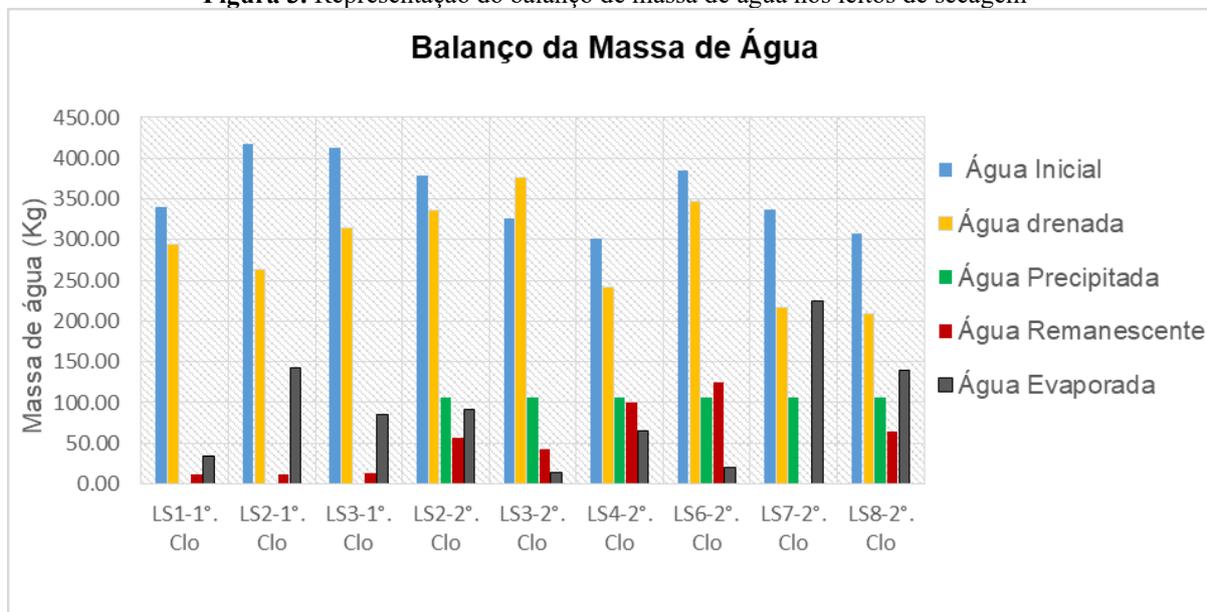
Com variação de 3% a 24.5%, a concentração de sólidos iniciais é influenciado pela tipologia dos sistemas sanitários e práticas de utilização. Por exemplo, as lamas dos balneários públicos (BP) apresentam valores mais baixos de concentração de sólidos totais e estes resultados estão associados a factores como: utilização de quantidades consideráveis de água, deposição de urina e excreta, fluxo elevado de utilização que consequentemente não favorece a estabilização da lama na fossa, para além dos produtos utilizados para higienizar a infraestrutura.

Contrariamente, as lamas oriundas das latrinas (LT) apresentam valores elevados, com excepção do leito de secagem nº7 que pode ter recebido lamas decantadas do camião vácuo como consequência do não revolvimento antes do enchimento dos leitos de secagem. O alto teor de sólidos totais é favorecido pelo facto das referidas latrinas constituírem sistema à seco e sem revestimento. Os resultados apresentados na tabela, são similares aos alcançados por Moiambo et al. (2020) e provavelmente deve-se a similaridade dos hábitos sócio culturais e condições das infraestruturas. No que tange a temperatura das lamas, as mesmas estão na gama mesofílica e segundo Montilha (2005) esta gama de temperatura favorece a digestão da matéria orgânica.

3.4. Desempenho da desidratação das lamas Fecais

Os leitos de secagem objectivam proporcionar a redução da quantidade de água existente nas lamas fecais através da drenagem gravítica da água livre e a evaporação da água adsorvida capilar. Estes processos, de forma combinada, foram responsáveis pela remoção de um percentual médio de 86.2% de água existente nas lamas. Na figura 3 é apresentado o balanço de água dos leitos de secagem estudados.

Figura 3. Representação do balanço de massa de água nos leitos de secagem



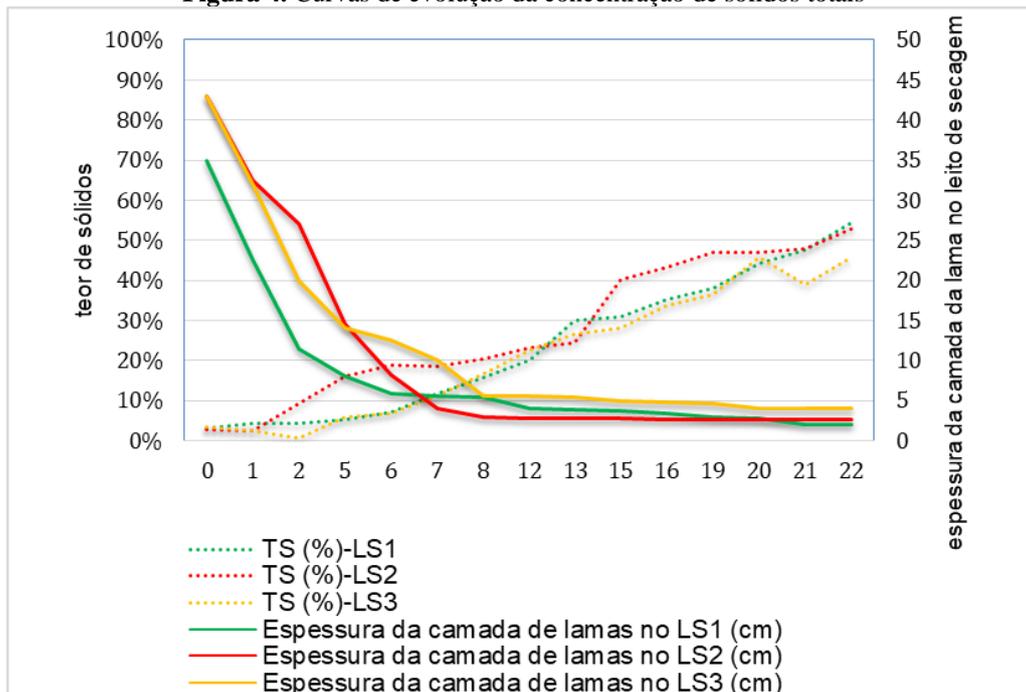
Fonte: Elaborado pelo Autor

Face a influência da variação sazonal do clima (principalmente da temperatura e radiação), a evaporação ocorreu de forma instável, porém contínua, com eficiência considerável após a remoção da água livre por drenagem gravítica. Nota que o pico da evaporação ocorreu no verão, mas, com registos consideráveis no 1º ciclo caracterizado por ocorrência de temperaturas amenas.

A massa líquida preliminar das lamas, sejam elas das LT, FS e BP, apresentaram valores consideráveis em razão das suas características intrínsecas (observadas na tabela 2) mas, foram no entanto obtidos valores de massa final muito diferentes. Este facto, tal como mencionado por Cofie et al. (2006) e Koné (2007) deve-se as diferentes massas totais de água precipitada e evaporada no decorrer do ciclo. A massa líquida drenada e evaporada dão lugar as variações da concentração de sólidos, com comportamento inversamente proporcional e uma tendência crescente dos seus valores em função do tempo.

Num período de duração de 22 dias, o primeiro ciclo experimental foi caracterizado por uma evolução significativa da concentração de sólidos totais, com aumento considerável do valor inicial da concentração de sólidos totais das lamas nosleitos de secagem estudado, como representa a figura 4.

Figura 4. Curvas de evolução da concentração de sólidos totais



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com base na figura, observa-se que inicialmente a água livre é removida por meio da drenagem gravítica, com concentração de sólidos a evoluir, sem variações significativas na primeira semana. Por razão disto, a curva de decaimento da espessura torna-se mais acentuada quando a espessura/profundidade inicial é maior. Noutra fase, a remoção adicional da água ocorreu por evaporação facilitada pela superfície de contacto exposta. Apesar da perda de água por evaporação ocorrer de forma lenta, a evolução da concentração de sólidos nesta fase é mais rápida, com variações mais significativas porque um menor volume de água libertada, tem impacto superior na concentração de sólidos.

Sob as mesmas condições climáticas e o mesmo periodo de tempo, o leito de secagem nº1 que é caracterizado pela menor espessura inicial, apresentou maior concentração de sólidos totais final, o que leva a crer que a espessura das camadas de lamas influencia na condução da evaporação da água existente nas lamas, e portanto não tanto a drenagem gravítica. Alguns estudos, como os desenvolvidos por Pescod (1971) e Strande et al. (2014) permitiu concluir que, para as mesmas condições climáticas e tipológicas das lamas, em um aumento de 10 cm da espessura da camada de lamas aplicada pode-se corresponder a duplicação do tempo de desidratação das lamas.

A Figura 5 apresentada a seguir, mostra como a evolução da concentração dos sólidos altera as características das lamas, formando fissuras e posteriormente torrões que facilitam o seu manuseamento e reaproveitamento.

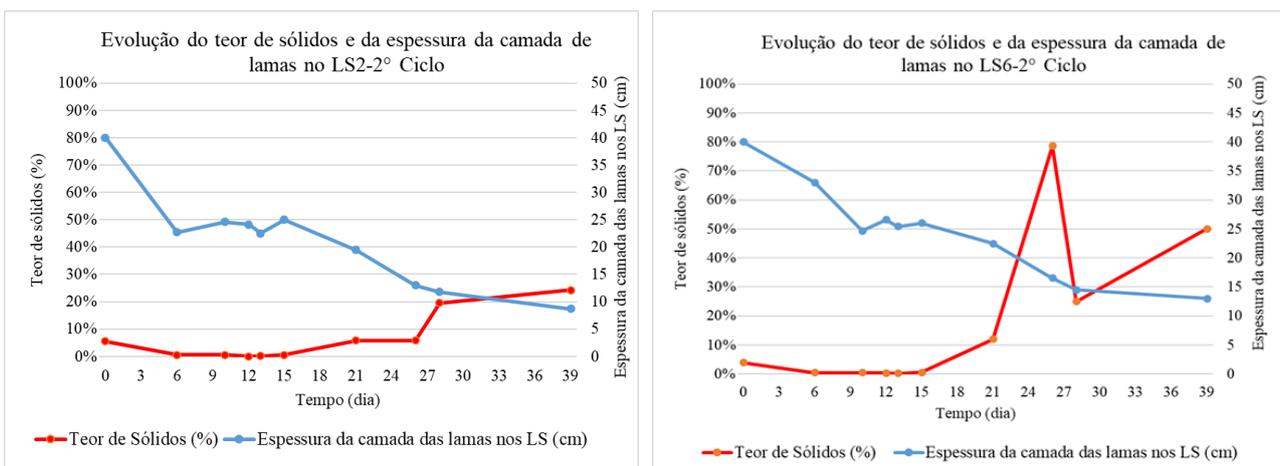
Figura 5. Evolução da concentração de sólidos nas lamas fecais



Fonte: Elaborado pelo Autor

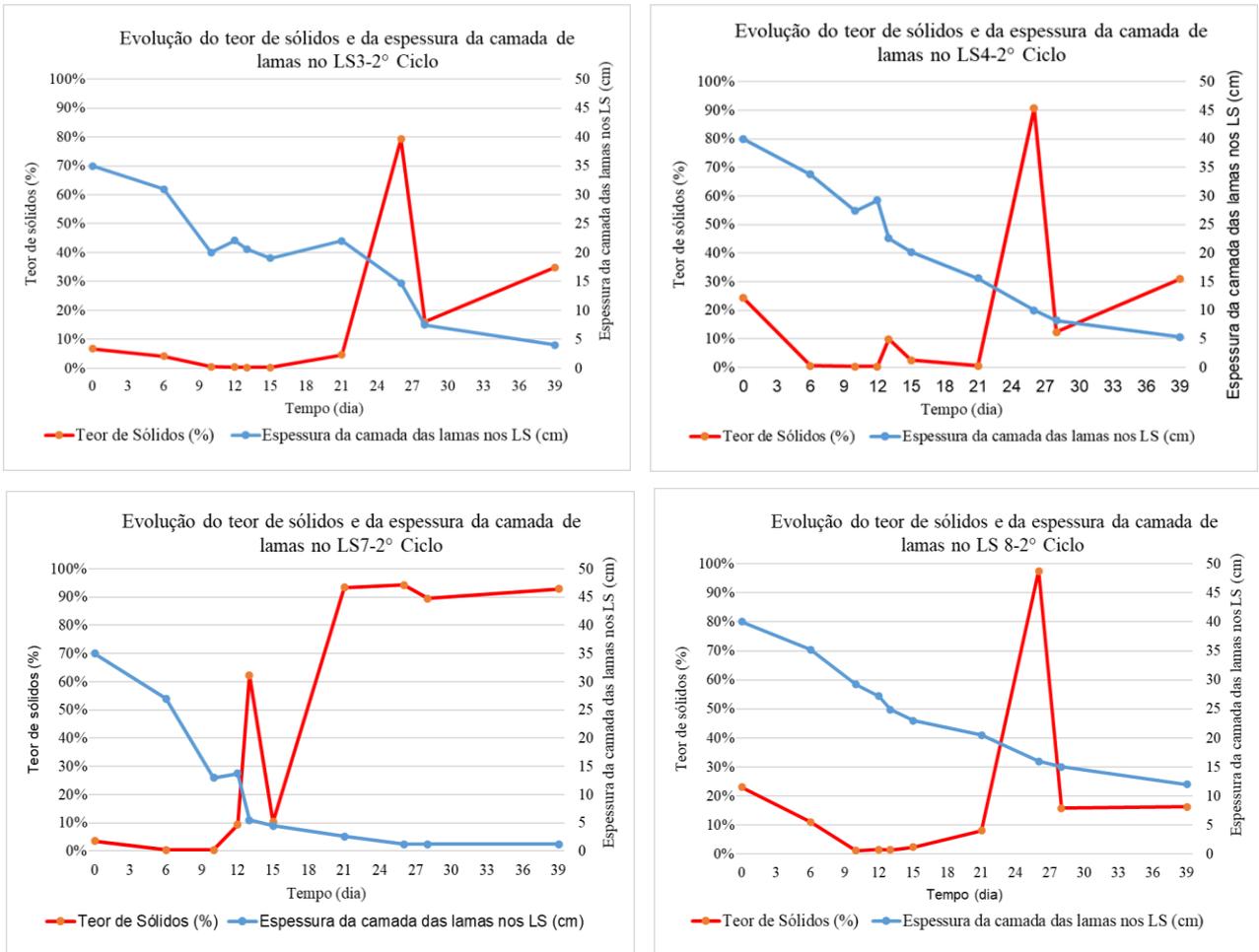
Diferente do primeiro ciclo de secagem, o segundo foi consideravelmente perturbado pela ocorrência da precipitação e outros elementos típicos do clima sazonal da região. Teve duração de 39 dias, porém com variações crescente e decrescente da concentração de sólidos, como podem-se observar nas figuras 6 e 7 que se seguem.

Figura 6. Curva de evolução da concentração de sólidos totais de lamas oriundas das fossas sépticas individuais (LS2 e LS6 do 2 ciclo)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 7. Curva de evolução da concentração de sólidos totais de lamas oriundas das latrinas (LS3; LS4; LS7 e LS8 do 2 ciclo)



Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras evidenciam que a evolução da concentração de sólidos e espessura das lamas não estão somente relacionados com a drenagem e evaporação. A precipitação tem expressão significativa e proporciona a alteração da tendência exponencial do decaimento da espessura com aumento da água numa média de 1.5cm de espessura em cada leito.

Com exceção do Leito de Secagen nº2, carregadas de lamas de fossas sépticas, em todo o segundo ciclo não foi verificado a tendência crescente constante da concentração de sólidos, ocorrendo redução considerável entre 26º e 28º dias. Essa redução deve-se provavelmente à precipitação ocorrida nestes dias. O impacto da precipitação não foi uniforme no decorrer da desidratação das lamas. Numa fase inicial, a ocorrência de eventos pluviométricos sobre as lamas resulta num aumento do seu teor de humidade e, conseqüentemente ocorre um retrocesso no processo de desidratação, como ocorreu nos leitos estudados no segundo ciclo de secagem. Contudo, se a precipitação ocorrer numa fase mais avançada do processo, quando se alcança o pico da drenagem gravitica ou por exemplo se as lamas apresentam superfície fissurada, de preferência profundas, a água precipitada é rapidamente escoada e removida pelos sistemas de drenagem, sem influência significativa na concentração de sólidos das lamas.

No caso específico do leito Leito de secagem nº8, a concentração de sólidos finais é relativamente menor do que a concentração de sólidos iniciais. Este facto extraordinário ocorreu pela combinação de factores que proporcionam instabilidade e retrocesso no processo de desidratação das lamas, nomeadamente: (i) a alta

concentração inicial de sólidos, que é característico das lamas das latrinas, deu lugar ao processo rápido de sedimentação, ocasionando a separação das partículas densas e a massa líquida. Formou-se no topo uma interface de líquida menos densa e os sólidos sedimentados formaram um filme espesso sobre a camada de areia existente no filtro. Este processo ocasionou o bloqueio dos poros, a redução da drenagem e como consequência, a desidratação passou a depender quase por completo da evaporação. (ii) a evaporação da massa líquida ocorreu gradualmente e de forma lenta, como é característico, porém, a humidade relativa e a precipitação registada entre o 26º e 30º dia ocasionou o aumento de água no leito, diluindo a lama e tornando difícil a desidratação.

Wang et al. (2007) no seu estudo também constatou que o desgaste dos filtros e as condições climáticas tem efeito significativo sobre o processo de desidratação de lamas fecais em leitos de secagem, referindo que estas condições regulam as taxas de drenagem e evaporação da água presente nas lamas e consequentemente o seu tempo de retenção nos leitos de secagem. Considerando este aspecto, para Soares et al. (2001), independentemente do teor de sólidos inicial das lamas fecais, o leito de secagem garante o aumento de cerca de 20% do teor de sólidos inicial, facto também observado em alguns gráficos das Figuras 6 e 7 deste estudo.

Segundo Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology-EAWAG (2008), quando bem projectados e operados, os leitos de secagem de lamas fecais podem produzir biosólidos que podem ser usados para o melhoramento de solos, como fertilizante na agricultura, ou depositado em locais adequados sem prejuízo para a saúde pública e o meio ambiente. Mensah et al. (2002) estudaram a possibilidade de co-compostagem de lamas desidratadas e resíduos sólidos orgânicos, numa instalação piloto e concluíram que sim, as lamas desidratadas em leitos de secagem podem ser utilizadas na co-compostagem com resíduos sólidos orgânicos. De acordo com Dias (2004), dependendo da qualidade das lamas, para além da agricultura, a sua utilização pode incluir a aplicação em solo florestal, recuperação de terrenos degradados, assim como taludes. Dingamnyel (2014) avaliou o desempenho dos leitos de secagem na eliminação da poluição microbiológica originada pelas lamas fecais, tendo constatado o bom desempenho dos leitos de secagem de lamas, com destaque para a redução significativa de coliformes fecais.

Portanto, dentre outros, os trabalhos mencionados ilustram as possibilidades de reaproveitamento e valorização das lamas fecais, facto que, segundo WHO (2006) representa importante ganho para os países em desenvolvimento que buscam soluções de saneamento eficientes e de baixo custo, assim como o aproveitamento dos subprodutos em diferentes frentes, como as mencionadas por Diener et al., (2014). Tal como afirmado por Soares et al., (2001) e Flaga, (2005), admite-se que este sistema de desidratação seja dos mais simples, naturais e económicos, se comparado com sistemas alternativos de desidratação mecânica. É um processo fundamental para a redução da carga de contaminantes presentes nas lamas fecais e facilita o manuseamento, tratamento secundário e reaproveitamento.

Outros estudos realizados por diferentes autores como Reymond (2008), Mahamane (2011) e Cissé (2011) indicam que as características das lamas fecais são altamente variáveis, em função do tipo de lamas em questão e condições específicas do local. Por isso, este estudo revela-se importante a medida que analisa os factores que afectam o desempenho dos leitos de secagem na desidratação de lamas fecais em condições específicas do município de Chimoio, abrindo horizontes para tratamentos subsequentes, o seu aproveitamento, valorização e/ou deposição final adequada.

4. Conclusão

Os ensaios realizados no segundo ciclo resultaram em concentrações de sólidos totais finais mais elevados, num período de exposição mais curto, como resultado das altas temperaturas e radiação solar elevada. Portanto, a ocorrência de eventos pluviais contínuos causou o retrocesso da desidratação, extendendo a duração do ciclo. Contrariamente, o primeiro ciclo apresentou-se mais estável, com tendência de aumento contínuo da concentração de sólidos, porém, em escalas menores em todo o ciclo. Para além dos eventos meteorológicos, a drenagem gravítica foi responsável pela remoção da maior quantidade de água existente nas lamas, principalmente em lamas de balneários públicos estudados no primeiro ciclo.

Desta forma, na sequência do trabalho realizado, importa considerar os seguintes aspectos: (i) Quanto mais estabilizadas as lamas se apresentam, mais fácil é a separação sólido-líquido; (ii) a espessura das lamas

nos leitos de secagem podem induzir a maior drenagem gravítica porém, reduz a exposição da superfície exposta à evaporação, tornando lenta a redução da humidade nas lamas do fundo do leitos; (iii) valores altos de temperatura e de radiação solar, e valores baixos de humidade relativa e precipitação proporcionam um desempenho considerável no processo de desidratação.

5. Agradecimentos

Agradecimentos ao projecto ZAMADZI NICHE 266/IPA (Investigação Por Acção), a Agência do Vale do Zambeze e a Faculdade de Engenharia Ambiental e dos Recursos Naturais da Universidade Zambeze pelo financiamento e apoio prestado na realização do estudo.

6. Referências

Botari, Alexandre e Bernardo, Luiz Di (2009) Modelação da perda de carga na filtração direta ascendente em meio granular de areia grossa e pedregulho, [Eletronic version] **Revista de Engenharia Sanitária Ambiental**, v.14 n.2, 245-256

Cofie, O., Awuah, E., Agbottaha, S., Strauss, M., Essekub, H., Montangero and Kone, D. (2006) Solid-liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: Implications for nutrient recycling in urban agriculture [Eletronic version], **Water Research Journal**, Vol 40, No 1.

Dias, J.C.S., (2004). “Guia de Boas Práticas , Aplicação de Lamas da Agricultura”. Reciclamos – Multigestão Ambiental, S.A., Agosto

Dingamnyel, L., (2014) **Analyse des paramètres sanitaires dans le traitement des boues de vidange sur lits de séchage à Ouagadougou**. Memoire Pour L’obtention du Master en Eau et Assainissement. Institut International d’Ingénierie. Ouagadougou - Burkina Faso.

EAWAG-Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (2008), Department of Water and Sanitation in Developing Countries, “Sandec Training Tool 1.0, Module 5 Faecal Sludge Management.

Flaga, A., (2005) “Sludge drying”, Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology.

Gold Moritz, Hidenori Harada, Jean-David Therrien, Takahiro Nishida, Michael Cunningham, Swaib Semiyaga, Shigeo Fujii, Caetano Dorea, Viet-Anh Nguyen & Linda Strande (2018) “Cross-country analysis of faecal sludge dewatering” [Eletronic version], **Environmental Technology**, 39:23, 3077-3087, DOI: 10.1080/09593330.2017.1374472

Harrison, L., Michaelsen. J., Funk, C., Husak, G.J. (2011). “Effects of temperature changes on maize production in Mozambique”. **Climate Research**, 46, 211-222.

INAM-Instituto Nacional de Meteorologia. (2019) Disponível em: inam.gov.mz/index.php/pt/. Acesso: em 2019

INE-Instituto Nacional de Estatísticas (2019), **Censo 2017- IV Recenseamento Geral da Populacao e Habitação**. Disponível em: www.ine.gov.mz

Koné, D., Cofie, O., Zurbrugg, C., Gallizzi, K., Moser, D., Drescher, S., Strauss, M. (2007). Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. [Eletronic version], **Water Research Journal**, Vol 41(19), pp. 4397-4402.

- Koné, D., e Strauss, M., (2004). **Low-cost Options for Treating Faecal Sludges (FS) in Developing Countries – Challenges and performance**. 9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control and to the 6th International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilisation Ponds, (p. 7). Avignon, France.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (200). “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated”. [Eletronic version] **Meteorologische Zeitschrift**, 15, 259-263.
- Kuffour, A., Awuah, E., Sarpong., Anyemedu., F., Koné, D., (2013).” Effects of Different Solid Loading Rates of Faecal Sludge on the Dewatering Performance of Unplanted Filter Bed”. [Eletronic version] **Civil and Environmental Research**. 4 (11), ISSN 2224-5790.
- Mahamane, I., (2011) Contribution à la gestion durable des boues de vidange de la ville de Ouagadougou : caractérisation des boues et évaluation du dimensionnement des STBV de Kossodo et Zagtouli. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Medeiros, A. R. M. de (2002) **Figueira (Ficus carica L.) do plantio ao processamento caseiro. Pelotas: Embrapa Clima Temperado**, 16 p.
- Mensah, A., Cofie, O., Montangero, A. (2003) **Lessons from a pilot co-composting plant in Kumasi, Ghana**. 29th WEDC International Conference Towards The Millennium Development Goals, Nigeria.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel H.D.(2003), **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th edition, McGraw-Hill Education**, International Edition, , ISBN 0-07112250-8
- Ministério da Administração Estatal (MAE). (2002). **Folha informativa dos Municípios II**. Maputo: MAE/Direcção Nacional de Desenvolvimento Autárquico.
- Moiambo O.J, Ferreira F.M.S., Matos J.S (2019). Modelação da drenagem em leitos de secagem de lamas. [Eletronic version] *Revista águas e resíduos*. IV.5
- Moiambo O.J, Mutevuie R., Ferreira F.M.S., Matos J.S (2020). Desempenho hidráulico e evolução do teor em E. Coli em leitos de secagem de lamas fecais em Moçambique. [Eletronic version] **Revista Águas e Resíduos**, APSB IV.6.
- Montilha, F. (2005). **Biogás – Energia renovável**. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil com ênfase Ambiental) – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2005.
- Pescod, M. B., (1971) “Sludge handling and disposal in tropical developing countries”. [Eletronic version] **Journal of Water Pollution and Control Federation** 43(4), p. 555-570.
- Pinheiro Rinaldo J. B. , Valli Andréa Nummer , Raube Ana Carla R (2017), Determinação da Condutividade Hidráulica das Principais Unidades Geológico-Geotécnicas De Santa Maria , Rs, São Paulo, UNESP. [Eletronic version], **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 347 – 363
- Pinto M. M., Matos J. S., Ferreira, F.,(2014) Sistemas locais de saneamento de baixo custo, Contribuição técnica para a análise de soluções Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Reymond, P. (2008) “Elaboration d'une méthodologie permettant de déterminer l'option la plus durable pour le traitement des boues de vidange dans une ville moyenne d'Afrique subsaharienne: application à la ville de Sokodé, au Togo”. Memoire Pour L'obtention du Master en Ingenierie de L'Environnement. École

Polytechnique Fédérale de Lausanne

Schoebitz, L., Niwagaba, C., e Strande, L., (2014). RRR - Project from Research to Implementation Component 1. Waste Supply and Availability Report, Kampala

Seck, A. et al., (2014) “Faecal sludge drying beds: increasing drying rates for fuel resource recovery in Sub Saharan Africa”. [Eletronic version] **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, pp. 72-80.

Semiyaga Swaib, Mackay A. E. Okure, Charles B. Niwagaba, Philip M. Nyenje & Frank Kansime (2018) “Enhancing faecal sludge dewaterability and end-use by conditioning with sawdust and charcoal dust:.. [Eletronic version] **Environmental Technology**, 39:3, 327-335, DOI: 10.1080/09593330.2017.1300191

Soares, S. R. A., Matos, Z. M. D. e Bernardes, R. S., (2001) “ Modelagem do processo de desidratção de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados”. [Eletronic version], **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, pp. 313-319.

Sonko EhM, Mbéguéré M, Diop C, Niang S, Strande L., (2014) “Effect of hydraulic loading frequency on performance of planted drying beds for the treatment of faecal sludge.” [Eletronic version], **Journal Water Sanitation Hyg Devel.**;4(4):633–641.

Stefan Diener, Swaib Semiyaga, Charles B. Niwagaba, Ashley Murray Muspratt, Jean Birane Gning, Mbaye Mbéguéré, Joseph Effah Ennin, Christian Zurbrugg, Linda Strande, (2014), “A value proposition: Resource recovery from faecal sludge—Can it be the driver for improved sanitation?,”. [Eletronic version], **Resources, Conservation and Recycling, Elsevier**, Volume 88, Pg 32-38,ISSN 0921-3449

Strande, L., Ronteltap, M. e Brdjanovic, D., (2014). Faecal Sludge Management - Systems Approach for Implementation and Operation. London: **The International Water Association Publishing**, ISBN13: 9781780404721.

United Nations Development Programme -UNDP (2010) **Climate Change Country Profiles**. Mozambique. Disponível em: <https://www.undp.org/publications/undp-climate-change-country-profiles?>

Wang, L. K., Li, Y., Shamma, N. K. e Sakellaropoulos, G. P., (2007).” Handbook of Environmental Engineering. Biosolids Treatment Processes in Drying Beds”. Totowa, New Jersey: The Humana Press Inc.,

World Health Organization-WHO (2006) “WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater in Agriculture”, Volume IV, Geneva, Switzerland. World Health Organization.

World Health Organization-WHO/UNICEF JMP. (2015). “Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation. Progress on Sanitation and Drinking Water”, Update and MDG Assessment.