DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO EM LEITO DE SECAGEM COM COBERTURA PLÁSTICA

Antonia Michelle Araújo Lopes; Rayssa Magalhães da Silva; Herenildo Aguiar Maciel; Aline Souza Sardinha.
DOI: 10.4322/978-85-455202-1-4-20

INTRODUÇÃO

A humanidade, após o advento da Revolução Industrial, vem modificando e interferindo, quase sempre negativamente, o equilíbrio dos ecossistemas terrestres. As atividades, produtos e serviços desenvolvidos pelo homem geram subprodutos que quando não tratados adequadamente implicam em prejuízos à saúde pública e ao meio ambiente. Além disso, o crescimento desordenado das cidades, o aumento populacional e a intensificação do consumo são fatores que tem como consequências, entre outras, a degradação dos recursos naturais e geração de resíduos e rejeitos de forma mais intensa que a capacidade de assimilação da natureza.

Nesse contexto, no Brasil, o setor de saneamento vem recebendo maiores investimentos nos últimos anos, e o aumento da prestação desse serviço reflete no volume crescente da produção de resíduos de composição complexa e destinação final problemática. Entre os resíduos do saneamento básico, os lodos provenientes das Estações de Tratamento de Água (ETA's) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) destacam-se pela grande quantidade gerada e pelos custos elevados para disposição final adequada (PEGORINI; ANDREOLI, 2006).

Dessa forma, o gerenciamento correto dos resíduos sólidos, incluindo os do saneamento, é tão necessário que a Agenda 21, documento produzido durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92), dedicou um Capítulo completo (Capítulo 21) para tratar do manejo ambientalmente saudável desses resíduos. O documento preconiza que mudanças nos padrões não sustentáveis de produção e consumo são fundamentais para conciliar o desenvolvimento com a proteção do meio ambiente, também defende a adoção da reutilização, reciclagem e destinação final adequada para promoção do manejo sustentável dos resíduos (CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1997).

O tratamento de esgotos gera além do efluente tratado, que é o objetivo do tratamento, gases e lodo. Para ser lançado no meio ambiente o efluente tratado deve atender padrões de qualidade, conforme estabelece a legislação. Os gases gerados, por sua vez, podem ser aproveitados para uso energético ou lançados na atmosfera. Já o lodo, que agrega a maior parte da matéria orgânica presente no esgoto bruto, é um desafio para as ETE's, pois além dos sólidos orgânicos o lodo concentra metais pesados e patógenos que oferecem riscos de contaminação do meio ambiente e da população que direta ou indiretamente entrem em contato com o mesmo (LIMA, 2010).

Assim, dependendo da forma de destinação final do lodo, é necessário que o mesmo passe por processos específicos de tratamento. No Brasil, a Resolução n° 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determina quais os parâmetros de qualidade para o lodo e produtos derivados destinados ao reuso agrícola. Por exemplo, para ser utilizado como insumo na agricultura o lodo deve ser tratado de modo a reduzir as concentrações de patógenos, o teor de umidade e o teor de matéria orgânica volátil.

A redução do teor de umidade pode ser realizada de forma natural através da técnica de leitos de secagem. Ela é importante para diminuir o volume de material a ser transportado, reduzindo os custos com transporte e disposição, e facilitar o manuseio do produto, além disso quanto menor o teor de umidade mais difícil será a sobrevivência e o crescimento de organismos patogênicos na massa de lodo (PEDROSA *et al.*, 2006).

Nesse contexto, fica evidente a necessidade de se estudar processos de tratamento e formas sustentáveis de destinação final para o lodo gerado em ETE's. Nesse cenário, o presente estudo se propõe a avaliar o desempenho de leito de secagem com cobertura plástica transparente para o tratamento do lodo proveniente da ETE Morada do Sol, localizada no município de Paragominas, Pará, Brasil.

Lá, existem duas estações compactas de tratamento de esgoto. As ETE's pertencem a dois condomínios construídos com financiamento do governo federal, através do Projeto Minha Casa, Minha Vida (Condomínio Morada do Sol e Morada dos Ventos). Ambas são operadas pela Agência de Saneamento de Paragominas (SANEPAR). O sistema de tratamento das duas ETE's utiliza reatores do tipo UASB + BF para tratar o esgoto doméstico.

Em relação ao sistema de coleta, transporte, tratamento e destinação final de esgoto sanitário do Condomínio Morada do Sol, que corresponde à área de estudo deste trabalho, possui capacidade para atendimento de 5.000 pessoas, considerando uma contribuição igual a 150l/hab./dia. Já o leito de secagem, foi construído recentemente pela SANEPAR para realização do tratamento do lodo gerado nas duas estações. O leito possui quatro módulos independentes, cada um com 50 m² e cobertura com filme plástico translúcido.

Com base no exposto acima, o desenvolvimento desse estudo dará suporte ao tratamento do lodo gerado nas ETE's do município de Paragominas, cujo objetivo é estudar o desempenho de um leito de secagem com cobertura plástica nos processos de desaguamento e higienização do lodo de descarte de uma estação de tratamento de esgoto, com avaliação do desaguamento e higienização do lodo no leito de secagem em dois períodos: chuvoso e seco, para caracterização e o lodo bruto e tratado (substâncias inorgânicas, estabilidade, potencial agronômico e indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos) e, finalmente, promover a verificação da viabilidade sanitária e agronômica para o reuso agrícola do lodo conforme os padrões estabelecidos pela Resolução 375/2006 - CONAMA.

REVISÃO DE LITERATURA

ESGOTO SANITÁRIO

O esgoto sanitário, também chamado de águas residuárias, possui características bem definidas, sendo constituído basicamente de despejos domésticos e pequenas contribuições de águas pluviais e águas de infiltração. Podendo, eventualmente, ter contribuição de despejos industriais (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

Cerca de 99,9% do esgoto sanitário é composto por água e, apenas 0,1% por sólidos, que são compostos orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras), nutrientes como nitrogênio e fósforo, além de produtos químicos, defensivos agrícolas e metais pesados (CAMPOS, *et al.*, 1999). Aproximadamente 30% dos sólidos encontrados nas águas residuárias são inorgânicos como metais pesados, areia e sais, e 70% é composto por matéria orgânica (LOZER, 2012).

De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) publicados no Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013, com relação ao atendimento por rede de esgotos, no Brasil o contingente de população urbana atendida alcança 93,3 milhões de habitantes. Já o índice médio de atendimento é de 56,3%, nas áreas urbanas das cidades brasileiras. Quanto ao tratamento dos esgotos, observa-se que o índice médio do país chega a 39,0% para a estimativa dos esgotos gerados e 69,4% para os esgotos que são coletados. A pesquisa destaca que o volume de esgotos tratados saltou de 3,586 bilhões de m3 em 2012 para 3,624 bilhões de m3 em 2013, correspondendo a um incremento de 1,1% (BRASIL, 2014). Embora os dados apontem que o saneamento no país ainda está aquém dos padrões ideais, nos últimos anos, no Brasil, ocorreu uma expansão dos serviços de coleta e tratamento de esgoto. Os recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) destinados ao setor de saneamento contribuíram significativamente para essa expansão (ARAUJO FILHO, 2008; LEONETI *et al.*, 2011).

Cabe ressaltar que apenas o tratamento das águas residuárias não elimina os riscos ao meio ambiente e à saúde pública, é necessário o gerenciamento do lodo gerado ao longo do tratamento, pois a destinação inadequada deste resíduo pode comprometer os ganhos adquiridos com a coleta e tratamento do esgoto (ANDREOLI; PINTO, 2001).

PROCESSO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO: REATORES UASB

DIGESTÃO ANAERÓBIA

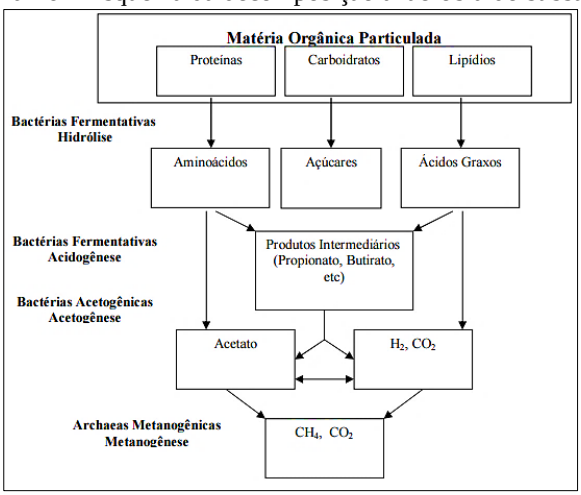
A digestão anaeróbia é um processo biológico complexo, desenvolvido em etapas e com várias populações de bactérias envolvidas. Na ausência de oxigênio molecular bactérias facultativas ou estritamente anaeróbias promovem a transformação de compostos orgânicos complexos como proteínas, lipídeos e carboidratos em produtos mais simples e estáveis como o metano (60 a 70%), gás carbônico (30 a 40%) e outros subprodutos mineralizados (CAMPOS *et al.*, 2006; FAGUNDES, 2010).

Dentre as principais vantagens do reator anaeróbio em relação ao aeróbio é possível citar: (1) baixo consumo de energia, (2) menor produção de lodo, diminuindo os custos com o tratamento e disposição final, (3) redução dos custos para implantação e operação, (4) possibilidade do aproveitamento energético do metano, (5) lodo com características que favorecem o desaguamento, (6) minimização da necessidade de atenção operacional, (7) boa inativação de patógenos, e (8) boa destruição de sólidos voláteis (40 a 60%) (FAGUNDES, 2010; LIMA, 2010).

Todavia, há desvantagens nesses processos como, por exemplo: (1) produção de maus odores, (2) longo período de partida do sistema, se não houver inóculo adequado, (3) sensibilidade a mudanças de condições ambientais, (4) pode ocorrer formação de espuma, e (5) sobrenadante rico em Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos em suspensão e amônia (FAGUNDES, 2010; LIMA, 2010). A conversão da matéria orgânica em sistemas anaeróbios ocorre em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essas fases são independentes e podem se desenvolver simultaneamente (LIMA, 2010).

A hidrólise, primeira fase da degradação anaeróbia, é considerada muito lenta e consiste na decomposição da matéria orgânica particulada biodegradável de cadeia longa (Figura 1), que não são assimiláveis pelas bactérias, em produtos solúveis como açucares e aminoácidos, pela ação de enzimas hidrolíticas extracelulares excretadas pelas bactérias.

Figura 16 – Esquema da decomposição anaeróbia do substrato.



Adaptado de Chernicharo (1997).

Os compostos solúveis ficam então acessíveis às bactérias, atravessando suas paredes celulares e membranas (CHERNICHARO, 1997; VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006). A etapa de hidrólise é realizada por vários tipos de bactérias. As principais bactérias proteolíticas presentes em digestores anaeróbios pertencem ao gênero *Clostridium*, sendo encontradas também *Peptococcus anaerobicus*, *Bibidobacterium sp*., *Staphylococcus* e algumas espécies de bacilos (PONTES, 2003).

No processo de acidogênese um grupo de bactérias transformam os compostos solubilizados em precursores de acetato, tais como álcoois (R-OH), ácido propiônico ($C_3H_6O_6$), butírico ($C_4H_8O_2$), valérico e isovalérico ($C_5H_{10}O_2$), capróico ($C_6H_{12}O_2$), acético ($C_2H_4O_2$), láctico ($C_2H_6O_3$), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H), além de novas células bacterianas. Esse estágio é denominado de fase ácida devido à grande quantidade de ácidos formados. A acidogênese é realizada por um grupo de bactérias fermentativas (*Clostridium* e *Bacteroids*). Quando a população de microrganismos metanogênicas se encontra presente em quantidade adequada, os ácidos são degradados à medida que são formados (PONTES, 2003).

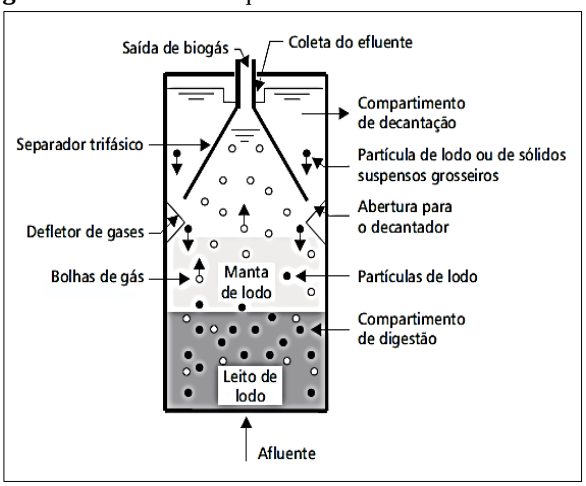
No processo de acetogênese os produtos da acidogênese são transformados em hidrogênio, dióxido de carbono e principalmente acetato e finalmente as bactérias metanogênicas utilizam o acetato para produzir metano (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

REATORES UASB

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (RAFA) mais conhecido pela sigla em inglês – UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket)* é um dos tipos de reatores anaeróbios disponíveis no Brasil. Foi desenvolvido na década de 70, na Holanda, sendo utilizado no Brasil desde a década de 80. O reator UASB possui diversas vantagens quando comparado aos demais sistemas de tratamento anaeróbios, por exemplo: (1) produção de lodo já estabilizado a custo reduzido, (2) tempo de detenção hidráulica menor, (3) odor desagradável passível de ser controlado, (4) sistema compacto, com baixa demanda de área, (5) baixa produção de lodo, (6) satisfatória eficiência de remoção de DBO e DQO, da ordem de 65 a 75% (CHERNICHARO *et al.*, 1999; FAGUNDES, 2010).

Nesse caso, o tratamento de esgotos em reatores UASB (Figura 2), depende da boa operação do pré-tratamento, a massa bacteriana apresenta sensibilidade a substâncias tóxicas presentes no afluente, as flutuações de vazões interferem negativamente sobre o sistema, e quase sempre é necessário a realização de pós-tratamento (FAGUNDES, 2010). Além disso, há possibilidade de produção de maus odores como aspecto negativo dos reatores UASB (CHERNICHARO *et al.*,1999).

Figura 17 – Desenho esquemático de um reator UASB.



Fonte: Chernicharo *et al.* (1999)

O afluente entra pela parte mais baixa e prossegue em fluxo ascendente, até o topo do Reator, atravessando três etapas: o leito de lodo, onde há grande concentração de biomassa ativa, logo após uma biomassa menos densa, denominada manta de lodo e finalmente passa por um separador de três fases, onde ocorre a separação dos sólidos em suspensão (lodo), do líquido e do biogás formado no tratamento (CAMPOS, *et al.*, 2006).

No entorno e acima do separador trifásico, configura-se uma câmara de sedimentação, onde o lodo mais denso é removido da fase líquida retornando ao compartimento de digestão. O sistema é auto misturado pela movimentação ascendente das bolhas de biogás e do fluxo de esgotos por meio do reator (FAGUNDES, 2010).

Ainda de acordo com esse autor, os reatores UASB devem possuir dispositivos que permitam a operacionalidade e monitoramento do sistema. Devem ser previstos dispositivos especiais que permitam a coleta de amostragem de lodo de diferentes profundidades, dispositivos para descarga do lodo excedente, para coleta de gás e manutenção do nível constante da interface líquido-gás.

PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

PRODUÇÃO

O lodo destaca-se como o principal resíduo do saneamento, pois embora represente geralmente entre 1 e 2% do volume do esgoto tratado, é responsável por 20 a 60% dos custos operacionais de uma ETE (ANDREOLI; PEGORINI, 2003). A produção de lodo é inerente aos sistemas de tratamento de esgoto utilizados para a fase líquida.

Os processos de tratamento primário geram o lodo primário, composto pelos materiais sedimentáveis do esgoto bruto. Este tipo de material pode produzir forte odor, principalmente se ficar retido por muito tempo nos decantadores primários, em condições de elevadas temperaturas (VON SPERLING, 2002). O lodo produzido nos sistemas de tratamento biológico é denominado lodo secundário ou lodo biológico. Este lodo é composto pela biomassa que cresceu alimentando-se da matéria orgânica presente no esgoto afluente. Caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo eventualmente sair com o efluente final (PEDROSA, *et al.*, 2010).

O tratamento biológico consiste na estabilização do material orgânico presente no esgoto a partir da utilização de microrganismos. As bactérias são as principais responsáveis por degradar a matéria orgânica, mas outros microrganismos como vírus e protozoários também podem ser encontrados. O tratamento biológico utiliza bactérias, que são majoritariamente heterotróficas, essas bactérias utilizam a matéria orgânica presente no efluente bruto como fonte de material ou energia (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

A utilização da matéria orgânica pelas bactérias como fonte de material para produção de massa celular compreende o processo denominado anabolismo ou assimilação. O anabolismo não é um processo espontâneo e para que ele aconteça é necessário que tenha disponibilidade de energia. Essa energia é liberada quando as bactérias degradam a matéria orgânica gerando produtos estabilizados. Quando as bactérias utilizam a matéria orgânica presente no esgoto como fonte de energia, transformando-a em produtos, ocorre o catabolismo ou desassimilação (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Ainda segundo estes autores o catabolismo pode ser oxidativo ou fermentativo. No processo oxidativo a matéria orgânica é oxidada por um oxidante extracelular presente no meio que pode ser o oxigênio, sulfatos ou nitratos, e os produtos são compostos inorgânicos estáveis, principalmente água e dióxido de carbono. No catabolismo fermentativo ocorre transferência intramolecular de elétrons, de modo que o composto catabolizado se decompõe em pelo menos duas partes. A digestão anaeróbia é um processo fermentativo de grande importância, que vai gerar principalmente metano e dióxido de carbono como produtos finais. No processo fermentativo grande parte da energia química

presente na matéria orgânica vai ficar contida nas moléculas de metano, reduzindo o efeito energético desse processo, quando comparado ao catabolismo oxidativo.

A eficiência na remoção do material orgânico pelas bactérias em sistemas anaeróbios depende essencialmente da cinética do metabolismo bacteriano. A cinética do metabolismo bacteriano nesses sistemas é bastante complexa devido à presença de várias populações bacterianas interdependentes atuantes no processo metabólico. A eficiência da remoção da matéria orgânica do esgoto também está relacionada a variável operacional idade do lodo, essa variável determina a proporção entre o material orgânico biodegradável e a massa bacteriana presente no sistema de tratamento. Dessa forma quanto maior a idade do lodo, maior será a população bacteriana atuante no processo de degradação da matéria orgânica e, portanto, maior será a eficiência de remoção do material biodegradável (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

COMPOSIÇÃO

O lodo de esgoto é um resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica (KELM *et al.*, 2014). O material orgânico presente no esgoto doméstico pode ser classificado em duas categorias principais: material biodegradável, que pode ser decomposto pelas bactérias, e material não biodegradável, que não é afetado pela ação bioquímica das bactérias. Tanto a fração biodegradável quanto a fração não biodegradável pode ser subdividida em uma fração solúvel, de fácil acesso ao metabolismo bacteriano, e uma fração particulada, composta de material coloidal e macroscópico que precisa ser hidrolisado antes de ser utilizado (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Além da fração orgânica, o lodo concentra microrganismos patogênicos, pode apresentar metais pesados, poluentes orgânicos (nos esgotos de origem doméstica se apresentam em pequenas quantidades), e fármacos (principalmente antibióticos) (LIMA, 2010).

O lodo apresenta uma composição bastante variável, pois, depende das características do afluente, do processo de tratamento do esgoto e do seu caráter sazonal (BETTIOL; CAMARGO, 2006). E quanto mais eficiente for o sistema de tratamento de esgoto, maior será a produção de lodo e a concentração de contaminantes (ANDREOLI.; PEGORINI, 2003).

MATÉRIA ORGÂNICA E NUTRIENTES

Um lodo de esgoto típico possui em média 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo e demais macronutrientes e micronutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos. A fração orgânica desse resíduo é uma mistura de gorduras, proteínas, carboidratos, lignina, aminoácidos, açúcar, celulose, material húmico e ácidos graxos, além de microrganismos vivos ou mortos (ZANATTA, 2014).

Em virtude da presença de matéria orgânica e de nutrientes no lodo, há um crescente interesse pela reciclagem agrícola desse resíduo. O lodo contribui para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo: ele aumenta a retenção de água em solos arenosos, e melhora a infiltração em solos argilosos, melhora a resistência dos solos a erosão e ao adensamento, ativa a vida microbiana dos solos e aumenta a resistência das plantas a pragas e doenças (ILHENFELD *et al.*,1999).

Os macros e micronutrientes são elementos químicos indispensáveis para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) são requeridos pelas plantas em maior quantidade, já os micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, B e Cl) são demandados em menor quantidade (MELO; MARQUES, 2000). No lodo de esgoto o potássio está presente em pequenas quantidades, porém encontra-se em forma prontamente assimilável pelas plantas (VON SPERLING *et al.*, 2001).

MATÉRIA INORGÂNICA (METAIS PESADOS)

A definição de metais pesados, do ponto de vista ambiental, diz respeito a elementos químicos que em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferecem riscos à saúde humana e ao meio ambiente. O lodo das estações de tratamento que recebem apenas efluentes domésticos contém pequena quantidade de metais pesados provenientes da própria natureza dos resíduos (fezes, urina, águas servidas, papel sanitário e águas cinzas) e das canalizações (ALAMINO, 2010; FERREIRA; ANDREOLI, C., 1999a).

Ademais, produtos vinculados a atividades humanas (cosméticos, produtos de limpeza, tintas e vernizes, pesticidas, produtos automotivos) apresentam em sua composição diversos metais, destacando-se o alumínio, ferro, mercúrio, cobre, titânio e o zinco, contribuindo para o aumento da concentração de metais no esgoto sanitário. As águas de infiltração também contribuem para o aumento da concentração de metais no lodo, pois vários metais são encontrados naturalmente no solo. E, à medida que a água da chuva infiltra os metais são lixiviados (LIMA, 2010).

Logo, a presença de metais pesados no lodo é bastante preocupante quando a destinação final do lodo é o reuso agrícola, pois há a possibilidade de acúmulo dos metais no solo, devido à aplicação sucessiva de material, com posterior absorção pelas plantas e contaminação da cadeia alimentar, podendo causar importantes impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (SILVA, 2000).

POLUENTES ORGÂNICOS

Os compostos orgânicos poluentes incluem os hidrocarbonetos aromáticos, fenólicos, pesticidas, polibromenatos, bifenil (PBB’s), bifelinas policlorados (PCB’s), surfactantes e outros materiais persistentes altamente tóxicos (FERREIRA; ANDREOLI, 1999a).

A presença de poluentes orgânicos no esgoto está associada, na maioria das vezes, a cidades muito industrializadas. Tais compostos podem estar presentes devido a efluentes domésticos (detergentes, restos de solventes e pinturas), industriais e águas pluviais. A maioria desses poluentes é biodegradada muito lentamente, persistindo no meio ambiente por longos períodos de tempo (ALAMINO, 2010). Os poluentes orgânicos podem penetrar na cadeia alimentar, e, mesmo em quantidades pequenas, podem estar presentes em quantidades elevadas nos níveis tróficos mais altos devido a sua característica de bioacumulação (ANDREOLI *et al.*, 2001).

MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS

Os principais grupos de organismos presentes no lodo de ETE são: bactérias, vírus, fungos e parasitas (protozoários e helmintos). Muitos desses organismos são patogênicos representando riscos à saúde humana e animal. A contaminação microbiológica do lodo está intrinsicamente relacionada a presença de material fecal no esgoto, logo tem relação direta com as características epidemiológicas da população local (sua influência nas condições sanitárias varia conforme o organismo e as condições ambientais) e dos efluentes lançados na rede coletora (ANDREOLI, *et al.*, 2001; FERREIRA; ANDREOLI, 1999a; MALTA, 2001). Vírus entéricos, protozoários e parasitas são obrigatoriamente parasitas, logo são incapazes de se multiplicarem no lodo, enquanto as bactérias podem multiplicar-se em condições ambientais favoráveis (LIMA, 2010). Dentre os organismos presentes no esgoto bruto e tratado, as bactérias e os ovos de helmintos representam os agentes de maior risco para a saúde pública e por isso merecem maior atenção (LOZER, 2012).

Consequentemente, de acordo com esse pesquisador, a presença de microrganismos patogênicos e o tempo de sobrevivência no solo (Tabela 1) é positiva, porém, no lodo é indesejada, uma vez que, alguns patógenos, como os ovos de helmintos, podem permanecer viáveis no solo por vários anos após a aplicação do lodo, e pode ocorrer a contaminação das partes das culturas que mantém contato direto com esse resíduo, causando riscos à saúde das pessoas.

Tabela 8 – Tempo de sobrevivência de patógenos no solo.

Patógeno	Máximo absoluto	Máximo usual
Bactérias	1 ano	2 meses
Vírus	1 ano	3 meses
Cistos de protozoários	10 dias	2 dias
Ovos de helmintos	7 anos	2 anos

Fonte: Lozer (2012).

No Brasil, os microrganismos patogênicos constituem o elemento de limitação ao uso do lodo como insumo na agricultura. No entanto, é o fator mais facilmente controlado através da adoção de soluções técnicas e processos específicos que levem a redução ou a eliminação do patógeno, como a calagem ou a compostagem, a digestão anaeróbia, a estabilização química e a secagem térmica (ANDREOLI, 1999a; BETTIOL; CAMARGO, 2006; FERREIRA; LOZER, 2012).

Dentre os agentes patogênicos encontrados no lodo maior cuidado é direcionado aos parasitas intestinais (ovos de helmintos), em virtude da alta frequência na população, o longo tempo de sobrevivência dos ovos no meio externo e sua baixa dose infectante: apenas um ovo é capaz de infectar um hospedeiro. Os ovos de helmintos presentes no esgoto sanitário ficam concentrados no lodo devido a sua elevada velocidade de sedimentação (ALAMINO 2010; LIMA, 2010). A temperatura e o tempo de exposição são fatores importantes para a higienização do lodo (Tabela 2).

Tabela 9 – Temperatura e tempo de exposição para a destruição de organismos patogênicos.

Organismo	Tempo (minuto)	Temperatura (ºC)
Salmonella spp.	60	55
Escherichia coli	60	55
Shigella	60	55
Taenia saginata	5	71
Ovos de *Ascaris* ssp.	60	55

Fonte: Andreoli, *et al.* (2001).

TRATAMENTO DO LODO

PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DO LODO

Os processos de estabilização têm por objetivo reduzir a quantidade de patógenos, eliminar os maus odores e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação do lodo (MIKI *et al.*, 2006). A estabilização de lodos de ETE pode ser realizada por processos biológicos, químicos e físicos (FERREIRA; ANDREOLI, 1999b).

A estabilização biológica utiliza bactérias específicas para digerir a matéria orgânica biodegradável. A estabilização química é realizada pela adição de produto químico para promover a oxidação da matéria orgânica. E a estabilização física é obtida com a ação do calor sobre a fração volátil do lodo (LIMA, 2010). Algumas das tecnologias usadas para a realização da estabilização são: estabilização química com cal, digestão anaeróbia (processo usado no presente estudo), digestão aeróbia, compostagem e tratamento térmico (MIKI *et al.*, 2006).

A estabilização com cal consiste na adição de cal ao lodo para elevar o pH acima ou igual a 12. A adição desse composto no lodo produz reações exotérmicas que somada à condição de pH elevado, limita a sobrevivência dos microrganismos, impedindo a putrefação do lodo, evitando a geração de maus odores e minimizando os riscos à saúde humana (MIKI *et al.*, 2006). Já a biológica, pode ser realizada por meio de digestão anaeróbia ou aeróbia do lodo líquido (ROCHA, 2009).

Quando aos processos biológicos, sabe-se que eles são eficazes na redução de odores, porém, o lodo continua com altos níveis de patógenos, e se o destino final escolhido for a reciclagem agrícola, será necessário um processo adicional de estabilização, e higienização, para tornar as características sanitárias do lodo compatíveis com o uso (FERNANDES; SOUZA, 2001). Um dos mecanismos para tal, é a redução de microrganismos patogênicos após processo de digestão anaeróbia (Tabela 3).

Tabela 10 – Redução de patógenos após digestão anaeróbia do lodo em número/100 ml.

Patógeno	Lodo bruto	Lodo digerido
Vírus	380 a 7 x 10^4	ND a 10^3
Coliformes totais	4,3 x 10^9 a 5,0 x 10^9	3,0 x 10^4 a 7,0 x 10^7
Coliformes fecais	1,4 x 10^9 a 10^9	ND a 7,8 x 10^6
Salmonella	3 a 4,6 x 10^4	3 a 62
Estreptococos	2,3 x 10^7 a 1,5 x 10^8	ND a 2,2 x 10^6
Ovos de helmintos	20 a 700	30 a 70

Fonte: Fernandes e Souza (2001).

Na digestão anaeróbia, a matéria orgânica contida no lodo é degradada por meio de processos metabólicos fermentativos com a formação de produtos gasosos estáveis como o metano e o dióxido de carbono conforme detalhado no item 3.3. A digestão anaeróbia reduz cerca de 35 a 60% de sólidos voláteis, dependendo da natureza do lodo e das condições operacionais do sistema de digestão (MIKI *et al.*, 2006), sendo capaz de reduzir os níveis de organismos patogênicos existentes no lodo, no entanto a etapa de higienização é necessária porque muitos parasitas intestinais e seus ovos permanecem ativos após processos de digestão convencional (ANDREOLI *et al.*, 2001).

DESAGUAMENTO DO LODO

O desaguamento ou desidratação de lodo é uma operação unitária que reduz o volume do lodo em excesso por meio da redução de seu teor de umidade. A capacidade de perda de umidade varia com o tipo de lodo. Essa variação na capacidade de deseguamento está diretamente relacionada ao tipo de sólido e à forma pela qual a água está ligada às partículas do lodo. Sob condições favoráveis é possível reduzir a umidade do lodo a níveis inferiores a 10%, inviabilizando a sobrevivência de organismos patogênicos (GONÇALVES *et al.*, 2001; PEDROSA *et al.*, 2006). O desaguamento do lodo é justificado pelos seguintes motivos (MIKI et al., 2006):

- Redução do custo de transporte para o local de disposição final.
- O lodo desaguado, geralmente, é mais facilmente manipulado.
- A desidratação permite incineração mais eficiente.
- Redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso agrícola;
- Pode garantir redução na geração de maus odores.

A desidratação do lodo pode ser realizada através de processos naturais ou mecânicos. Como processos naturais pode-se citar leitos de secagem e lagoas de lodo. Já os processos mecânicos mais utilizados no Brasil são centrífugas, prensas desaguadoras e filtros-prensas (GONÇALVES *et al.*, 2001).

LEITOS DE SECAGEM

A secagem do lodo tem grande impacto nos custos de disposição final: quando o lodo é desidratado de uma concentração de 2% de sólidos para 20% de sólidos o seu volume é reduzido em 90%. Os sistemas naturais de secagem de lodo são dependentes do clima, favorecendo a adoção dessas técnicas em regiões quentes. Leitos de secagem são indicados para comunidades de pequeno e médio portes, com ETE’s tratando uma população equivalente de até 20 mil habitantes localizada em áreas afastadas da zona urbana (FERREIRA, 2001; FERREIRA; ANDREOLI, 1999b).

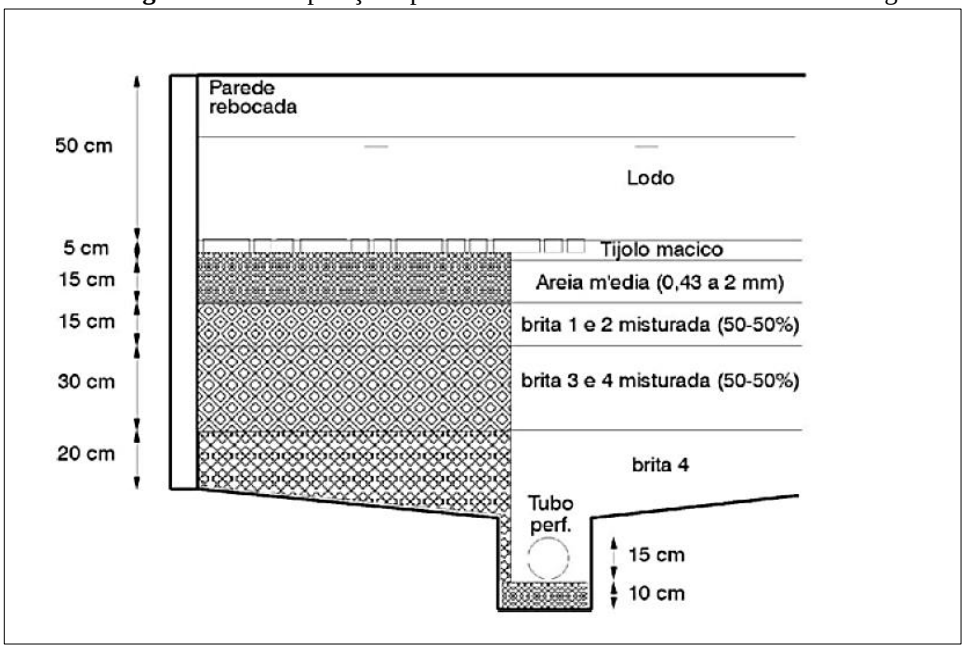
A efetividade do processo de secagem do lodo ao ar depende muito do clima local: a secagem ocorre mais rapidamente e mais completamente em clima quente e seco, e mais lentamente em clima frio e úmido (LOZER, 2012). A secagem natural do lodo pode promover, em determinadas situações, uma remoção considerável de organismos patogênicos devido à exposição prolongada do material ao sol, que eleva a temperatura do lodo (GONÇALVES *et al.*, 2001).

A remoção de umidade do lodo em leitos de secagem ocorre através de dois mecanismos distintos: percolação e evaporação. Geralmente a maior parte da água é removida por percolação. Durante as primeiras 72 horas, a percolação é a responsável pela eliminação da grande maioria do líquido; após esse período, o lodo adquire consistência pastosa. A percolação cessa quando a umidade do lodo chega a 80%, aproximadamente. A partir daí, para que o teor de sólidos do lodo aumente é necessário que a água evapore (PEDROSA, *et al.*, 2006).

A camada drenante é constituída por camada suporte, meio filtrante e sistema de drenagem. Os leitos de secagem geralmente ficam ao ar livre, mas podem também ser dotados de cobertura que impeça a entrada da água de chuva, porém com aberturas laterais para facilitar a evaporação (FERREIRA; ANDREOLI, C., 1999b).

A camada suporte é constituída por tijolos perfurados capazes de manter a estabilidade mecânica do sistema e ao mesmo tempo permitir a passagem do excesso de água. O meio filtrante é composto por camadas de brita, seguida de areia. Já o sistema de drenagem é constituído de tubos perfurados dispostos abaixo do meio filtrante, drenando o líquido percolado através das camadas superiores (JORDÃO; PESSÔA, 2005). Val ressaltar que há uma composição típica do sistema de drenagem de um leito de secagem (Figura 3).

Figura 18 – Composição típica da camada drenante de um leito de secagem.



Fonte: autores (2015)

Cada leito é operado individualmente e deve receber todo o volume a ser desaguado de uma só vez (GONÇALVES *et al.*, 2001). O tempo necessário para um ciclo de secagem de lodo num leito (Tt) se compõe de quatro períodos diferentes (AISSE; ANDREOLI, 1999):

Tt = T1 + T2 + T3 + T4 (dias)
Onde:
T1 = Tempo para preparação do leito e descarga do lodo;
T2 = Tempo de percolação;
T3 = Tempo de evaporação para se atingir a fração desejada de sólidos;

T4 = Tempo para remoção dos sólidos secos.

Os períodos T1 e T4 dependem essencialmente de fatores relacionados com a gerência do leito (AISSE; ANDREOLI, F., 1999).

Em condições climáticas normais, o lodo poderá ser removido do leito de secagem após um período de 12 a 20 dias, com a umidade em torno de 70 a 60% (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

LEITOS DE SECAGEM COM COBERTURA PLÁSTICA

A adição de cobertura plástica transparente em leitos de secagem, permite que o leito adquira configuração de uma estufa agrícola, evita a entrada de água da chuva e melhora o aproveitamento da energia solar para aumentar a temperatura do lodo; contribuindo para a aceleração da perda de umidade e destruição de organismos patogênicos. O aumento da temperatura se dá mediante a absorção pelo lodo da irradiação solar (PEDROSA *et al.*, 2006).

Estudos realizados em diferentes regiões brasileiras testaram o uso de estufas agrícolas com e sem revolvimento do lodo como método de higienização. Nesses estudos, o revolvimento expõe a camada inferior do perfil do lodo à superfície, proporcionado a exposição à radiação solar, redução de umidade e, consequentemente, redução de organismos patogênicos (COMPARINI; ALÉM SOBRINHO, 2003). A destruição de organismos patogênicos se torna particularmente importante se o lodo seco for utilizado como insumo na agricultura (GONÇALVES *et al.*, 2001)

O processo de secagem do lodo nos leitos é fortemente influenciado pela temperatura ambiente e pela umidade relativa do ar. O processo de secagem pode levar de algumas semanas a alguns meses devido à influência desses fatores. A adição de cobertura no leito pode contribuir para o controle desses fatores ambientais agilizando o processo de secagem do lodo. A utilização de leitos de secagem com cobertura plástica além de impedir a entrada da chuva possibilita o uso da energia solar para aquecer o lodo, reduzindo dessa maneira a concentração dos agentes patogênicos (BORGES *et al.*, 2009).

DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO USO AGRÍCOLA DO LODO RESOLUÇÃO Nº 375/2006 DO CONAMA

No Brasil o uso do biossólido como insumo agrícola deve seguir as exigências estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 375 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 (BRASIL, 2006). Nessa Resolução são especificados os padrões de qualidade do lodo com relação à concentração máxima permitida de compostos inorgânicos (metais pesados), compostos orgânicos e agentes patogênicos para o lodo destinado ao reuso agrícola.

A Resolução nº 375/2006 do CONAMA aborda vários aspectos relacionados ao gerenciamento do lodo e de seus produtos derivados (produtos destinados ao uso agrícola que contem lodo em sua composição) para aproveitamento na agricultura e também como evitar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Bem como a caracterização do lodo de esgoto ou de produto derivado deve abordar os aspectos de estabilidade, potencial agronômico, substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas e indicadores bacteriológicos e patogênicos. Finalmente, essa resolução apresenta diretriz quanto a estabilidade leva em consideração a relação entre sólidos voláteis (SV) e sólidos totais (ST). E para que o lodo seja considerado estável a relação SV/ST deve ser inferior a 0,7.

De acordo com as concentrações de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos no lodo de esgoto ou produto derivado (Tabela 4), a Resolução classifica o lodo ou produto derivado em Classe A ou Classe B. O lodo Classe A tem uso mais abrangente que a Classe B, sendo seu uso

proibido em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. O uso do lodo ou produto derivado Classe B é restrito ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

Tabela 11 – Limite máximo de concentração de metais para lodo ou produto derivado destinado ao reuso agrícola. Paragominas – PA.

Parâmetros	Concentração Máxima permitida (mg/kg, base seca)
Arsênio (As)	41
Bário (Ba)	1300
Cádmio (Cd)	39
Chumbo (Pb)	300
Cobre (Cu)	1500
Cromo (Cr)	1000
Mercúrio (Hg)	17
Molibdênio (Mo)	50
Níquel (Ni)	420
Selênio (Se)	100
Zinco (Zn)	2800

Fonte: Brasil (2006).

De acordo com a legislação atual, deve-se promover o monitoramento de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos, bem como a concentração máxima permitida para reuso agrícola do lodo e de produtos derivados (Tabela 5).

Tabela 12 – Concentração de patógenos por classe de lodo ou produto derivado. Paragominas – PA.

Concentração de patógenos	
Lodo de esgoto ou produto derivado Classe A	
Coliformes Termotolerantes	$<10^3$ NMP / g de ST
Ovos viáveis de helmintos	<0,25 ovo / g de ST
Salmonella	ausência em 10 g de ST
Vírus	<0,25 UFP ou UFF / g de ST
Lodo de esgoto ou produto derivado Classe B	
Coliformes Termotolerantes	$<10^6$ NMP / g de ST
Ovos viáveis de helmintos	<10 ovos / g de ST

Fonte: Brasil (2006).

UTILIZAÇÃO DE BIOSSÓLIDO NA AGRICULTURA

O lodo produzido em ETE's quando processado adequadamente de forma a possibilitar o seu manuseio seguro para aplicação em alguma modalidade de uso benéfico, como o reuso agrícola, recebe o termo de biossólido. De acordo com existem várias formas tecnicamente aceitáveis de destinação final para o lodo proveniente de ETE's. As mais usuais são: reuso agrícola, disposição em aterro sanitário, incineração e *landfarming.* O lodo tem alto teor de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, o que viabiliza a sua utilização na agricultura após tratamento adequado que vise a estabilização, desaguamento e higienização do lodo (ANDREOLI; PEGORINI, 2003; FERREIRA; ANDREOLI, 1999c; VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO 2006).

O reuso do lodo na agricultura, além de transformar um resíduo em um importante insumo agrícola que fornece matéria orgânica e nutrientes ao solo, também gera benefícios indiretos ao homem e ao meio ambiente. Os benefícios incluem a redução dos danos à saúde humana causados pela incineração, redução da dependência de fertilizantes químicos e melhoria das condições para o balanço do dióxido de carbono pelo incremento da matéria orgânica no solo (FERREIRA, 2001).

MATERIAL E MÉTODOS

Serão abordados a seguir os assuntos: descrição geral do plano experimental, caracterização da área de estudo, descrição do tratamento realizado na ETE Morada do Sol, construção do leito de secagem, plano de amostragem e as metodologias utilizadas para análise do desaguamento e higienização do lodo para fim de reuso agrícola.

DESCRIÇÃO DO PLANO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi realizada em leito de secagem localizado no município de Paragominas, com a finalidade de caracterizar o lodo bruto e o tratado, verificando seu desaguamento e higienização. O leito de secagem é operado pela Agência de Saneamento local, contendo cobertura de lona plástica translúcida, semelhante a uma estufa agrícola. O mesmo possui 4 módulos independentes, sendo que cada módulo possui uma área de 50 m².

Para efeito de análise da viabilidade sanitária e ambiental do lodo após os processos de desaguamento e higienização, a escolha dos parâmetros analisados baseou-se nos determinantes contidos na Resolução Conama 375/2006 – que dispõe sobre o reuso agrícola do lodo de esgoto.

O monitoramento do desaguamento e higienização do lodo foi realizado em dois momentos distintos (Tabela 6). Foram realizadas duas descargas do lodo no leito de secagem: uma no período mais chuvoso (abril e maio) e uma no período menos chuvoso (julho e agosto), visando obter dados sob diferentes influências climáticas.

Tabela 13 – Período do monitoramento. Paragominas – PA.

Ciclo	Meses	Início	Fim	Período
1º Ciclo	Abril e maio	29/04/2015	26/05/2015	Chuvoso
2º Ciclo	Julho e agosto	07/07/2015	03/08/2015	Seco

Fonte: autores (2015)

Quanto aos parâmetros físicos e químicos analisados, eles foram efetuados em coletas distintas nos dois ciclos.

Tabela 14 – Parâmetros analisados nas coletas. Paragominas – PA.

Coleta	Parâmetros analisados
1ª e 5ª coletas	Potencial agronômico do lodo (carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, nitrogênio total, pH em água (1:10), potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade, sólidos voláteis, e sólidos totais). Caracterização química do lodo quanto à presença dos seguintes elementos: As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni, Se, Mo e Zn. Presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella*). Caracterizar o lodo quanto ao aspecto estabilidade. Temperatura e umidade relativa externa a estufa no momento da coleta. Temperatura e umidade relativa interna a estufa no momento da coleta. Temperatura do lodo no momento da coleta. Altura do lodo no leito de secagem.
2ª, 3ª e 4ª coletas	Presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella*). pH, umidade, sólidos voláteis e sólidos totais. Temperatura e umidade relativa externa a estufa no momento da coleta. Temperatura e umidade relativa interna a estufa no momento da coleta. Temperatura do lodo no momento da coleta. Altura do lodo no leito de secagem.

Fonte: autores (2015)

Para cada ciclo, foram previstas cinco coletas, com defasagem máxima de sete dias, obedecendo aos parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA 375/2006. Em todas as amostras

foram monitorados os parâmetros ST e SV buscando avaliar a estabilidade do lodo, umidade e pH, além dos parâmetros *Salmonella sp*., ovos viáveis de helmintos e coliformes termotolerantes, analisados visando promover o adequado enquadramento do biossólido nas classes de lodo de esgoto ou produto derivado denominadas A e B, que diferem entre si pelas exigências de concentrações limites presentes no lodo para determinação das culturas aptas a receberem o produto final.

Os parâmetros dos itens de potencial agronômico e substâncias inorgânicas da referida resolução foram verificados no início e término de cada ciclo de monitoramento (1ª e 5ª coletas).

Durante a realização dos experimentos foram monitoradas *in loco*, no momento das coletas, as temperaturas e umidades máximas e mínimas internas e externas à estufa. Além disso, foi considerado o índice de precipitação para o período do experimento, através de consulta ao INMET.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Paragominas localiza-se no estado do Pará, entre os meridianos 2º 25’ e 3º 48’ de latitude sul e 46º 25’ e 48º 53’ de longitude oeste, a uma altitude de 90 m, abrange uma área de 19.342,254 km², localizado na região fisiográfica Guajarina, microrregião de Paragominas, no sudeste do estado. A distância entre o município e a capital paraense, Belém, é de aproximadamente 300 km (SANEPAR, 2014).

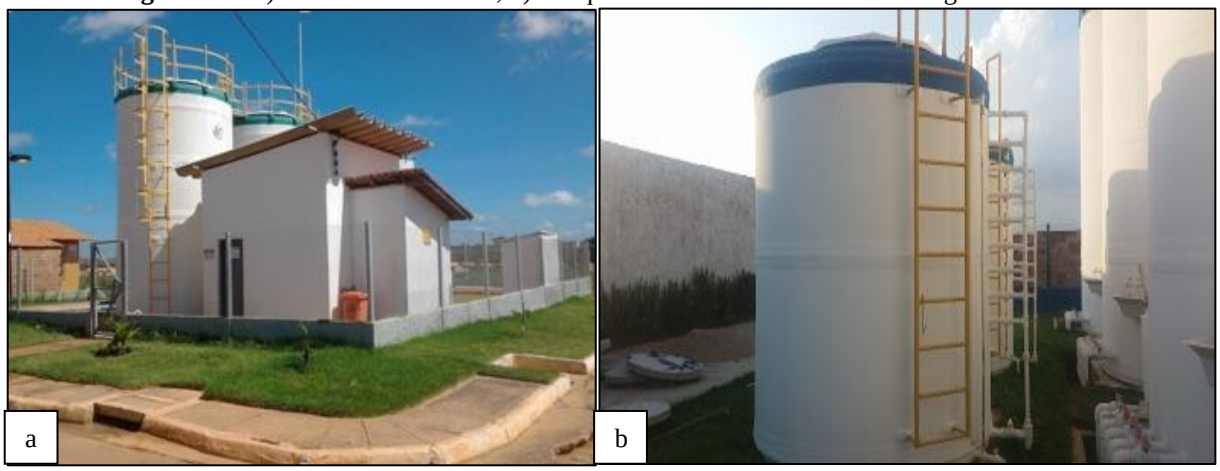
A estimativa da população residente no município para o ano de 2014 foi de 105.417 habitantes (IBGE, 2014). O clima do município de Paragominas é do tipo mesotérmico e úmido. (A temperatura média anual é elevada, em torno de 25º Célsius). Seu regime pluviométrico fica, geralmente, entre 2.250 mm e 2.500 mm anuais. As chuvas, apesar de regulares, não se distribuem, igualmente, durante o ano, sendo de janeiro a junho sua maior concentração (cerca de 80%), implicando grandes excedentes hídricos e, consequentemente, grandes escoamentos superficiais e cheias dos rios. A umidade relativa do ar gira em torno de 85% (SEPOF, 2007).

O município de Paragominas possui um dos melhores índices de saneamento do estado do Pará, com cerca de 80% da população urbana com abastecimento de água tratada, e um avanço gradativo no setor de esgotamento sanitário, que atende atualmente cerca de 10 % da população urbana. O município atualmente realiza a construção de uma Estação de Tratamento que atenderá toda a cidade, através de fases de expansão (SANEPAR, 2014).

DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA ETE. CONJUNTO RESIDENCIAL MORADA DO SOL

A ETE do Condomínio Morada do Sol (Figura 4a) apresenta a capacidade para atendimento de 5.000 pessoas, considerando uma contribuição igual a 150l/hab./dia e apresenta o tanque de adensamento de lodo (Figura 4b), unidade relevante na operação da referida estação.

Figura 19 – a) ETE Morada do Sol; b) Tanque de adensamento de lodo. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015)

De acordo com os valores apresentados, a eficiência atual da ETE Morado do Sol é de 80,31% para remoção de DBO, tanto no esgoto bruto e efluentes finais (Tabela 7).

Tabela 7 - Caracterização do afluente e efluente da ETE Morada do Sol. Paragominas – PA.

Parâmetro	Afluente	Efluente
Amônia (NH_3)	62,4 mg/L	50,1 mg/L
$DBO_{20°C}$	162 mg/L de O_2	31,9 mg/L de O_2
DQO	361 mg/L de O_2	116 mg/L de O2
Fósforo Total	5,11 mg/L	5,10 mg/L
Materiais sedimentáveis	5,0 mL/L	3,0mL/L
Nitrato	0,7 mg/L	0,9 mg/L
Nitrogênio total	75 mg/L	62 mg/L
Oxigênio Dissolvido	183 mg/L de O2	190 mg/L de O_2
pH	6,56 a 21,7°C	6,59 a 21,7°C
Sólidos Totais	287mg/L	370 mg/L
Temperatura	28°C	28°C
Turbidez	105 UNT	110 UNT

Legendas: DBO – Demanda Biológica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; pH – potencial hidrogeniônico; UNT – Unidades Nefelométricas

Fonte: autores (2015)

O tratamento realizado na Estação está dividido em duas etapas: (1) pré-tratamento, composto de poço de visita, caixa de remoção de areia, retenção e drenagem de materiais grosseiros, poço de sucção com bombas de transferências; (2) tratamento biológico do lodo (Tabela 8).

Tabela 15 – Dimensões dos componentes da ETE Morada do Sol. Paragominas – PA.

Reator Anaeróbio- UASB				
Unidades	Diâmetro útil	Altura útil	Volume útil	Configuração
2	Ø 3.200 mm	5.780 mm	46.47 m³	Cilíndrico, vertical, fundo plano apoiado.
Tanque Adensamento de Lodo (TAL)				
Unidades	Diâmetro útil	Altura útil	Volume total	Configuração
2	Ø 2.500 mm	2.500 mm	7,85 m3	Cilíndrico, vertical, fundo plano apoiado.
Tanque de Contato de Desinfecção (TCD)				
Unidades	Diâmetro	Altura Total	Volume Útil	Configuração
1	Ø 3.000 mm	1.500 mm	10,60 m³	Cilíndrico, vertical, fundo plano apoiado.

Fonte: Sanepar (2013).

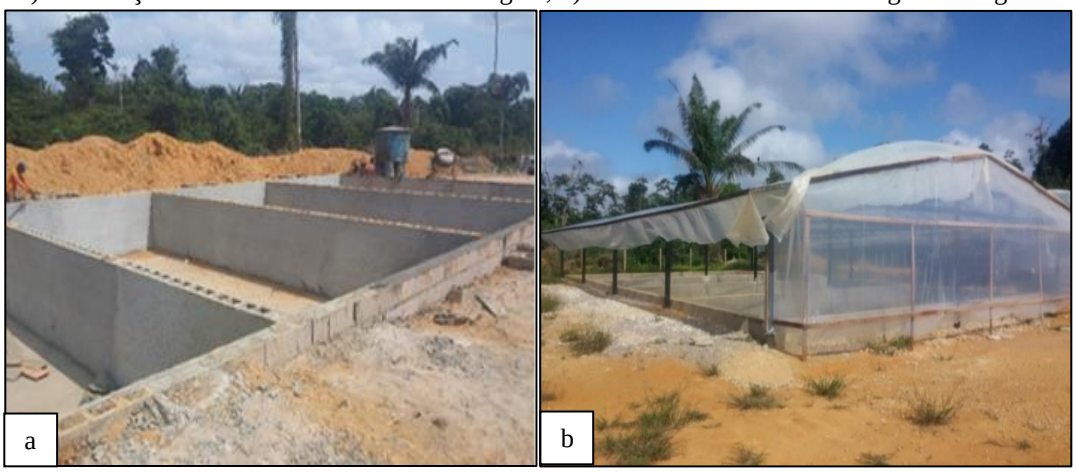
Os efluentes sanitários ao chegarem na estação, passam por uma calha Pashal e encaminham-se a uma etapa de pré-tratamento, envolvendo o gradeamento e caixa desarenadora, visando a remoção de sólidos grosseiros e areia. Posteriormente, os efluentes passam pelo reator UASB. Nessa unidade de tratamento, a depuração decorre de um intenso contato entre esgoto afluente e um manto de lodo suspenso previamente maturado, rico em microrganismos anaeróbios, presentes no equipamento. Depois de passar pelo reator, os efluentes seguem para o filtro anaeróbico, que complementa o tratamento retendo sólidos, conferindo maior estabilidade ao efluente.

O tanque de adensamento destina-se ao armazenamento do lodo produzido nos reatores anaeróbios, para posterior descarte. De modo que esta unidade contribui para a estabilização do lodo. No entanto, ressalta-se a importância da operação de descarga do excesso do lodo nos tanques, visando assegurar a obtenção de um efluente final isento ou com baixa concentração de sólidos em suspensão. O serviço de limpeza desses tanques ocorre através de contrato com empresa terceirizada, onde um caminhão promove a sucção do lodo dos tanques e em seguida o desagua nos leitos de secagem para continuidade do tratamento.

ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DO LEITO DE SECAGEM

O leito de secagem, foi dividido em 4 módulos independentes com 10 m de largura por 5 m de comprimento cada (Figura 6a), haja vista a baixa geração de lodo para preencher toda a área simultaneamente. Vale ressaltar que o estudo acompanhou a construção do leito de secagem (Figura 6b)

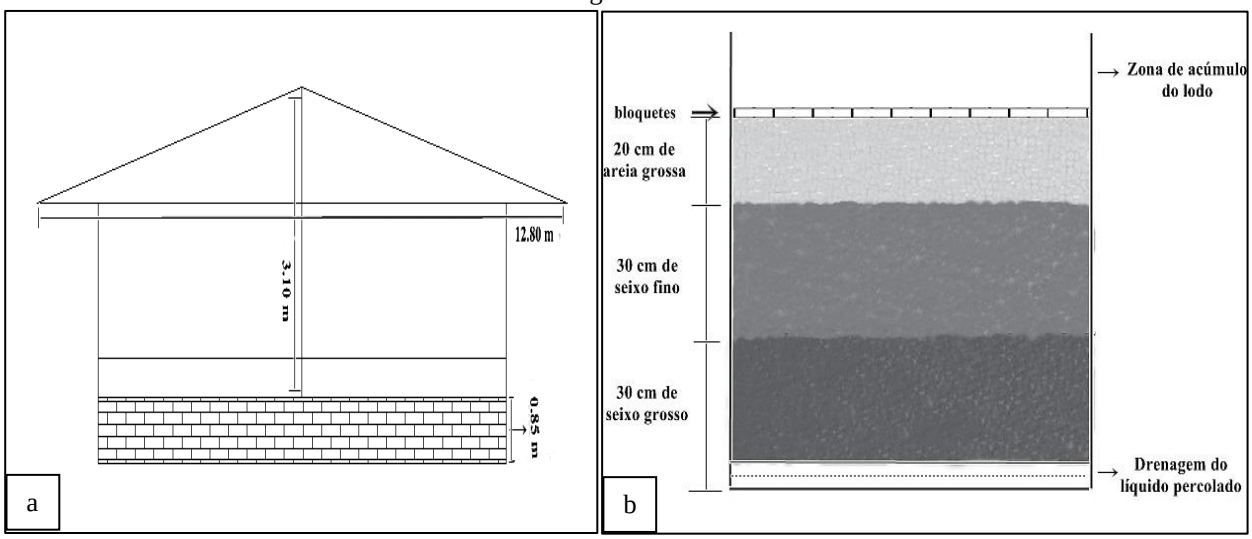
Figura 20 – a) Construção dos módulos e do leito de secagem; b) Cobertura dos leitos de secagem. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

Nessa pesquisa, foi monitado apenas um módulo do leito, sendo o mesmo para os dois ciclos. Ele possui a parte superior e a frontal cobertas por lona plástica translúcida, com 150 micrômetros de espessura para evitar a entrada de água da chuva, sendo as laterais abertas, facilitando a ventilação interna e a remoção da umidade dentro da estufa, uma vez que essa se torna elevada por conta da evaporação da água livre contida no lodo. Em relação a cobertura do leito (Figura 7a) e o leito de secagem (Figura 7b), ambos foram construídos durante essa pesquisa.

Figura 7 – a) Detalhes da cobertura do leito de secagem; b) composição do meio filtrante do leito de secagem. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

Vale ressaltar que a cobertura do leito foi construída com altura máxima central de 3,10 m acima da mureta dos módulos, que possuem 0,85 m sob a camada de areia, estando esta altura de acordo com os valores entre 0,5m e 1 m (NBR 12209/1992), com a finalidade de evitar a entrada de águas pelo escoamento superficial da área. Em relação ao a estrutura do leito, ela foi alocada entre pilares e arcos de sustentação de madeira. Mas, durante os 15 primeiros dias do primeiro ciclo de monitoramento, o leito não contava com a lona plástica na parte frontal, esta foi colocada posteriormente, visando evitar a influência da água da chuva, uma vez que a direção do vento promovia este lançamento para dentro do leito, o que poderia resultar numa possível interferência na umidade do lodo.

Em relação ao fundo do leito de secagem, ele possui a função de promover a remoção do líquido intersticial, através do material drenante, e o meio filtrante dos leitos de secagem deve ser composto de brita e areia em diferentes granulometrias (NBR 12209/19920). Ele possui paredes e fundo impermeabilizados sob a camada do meio filtrante (Figura 8), sendo o fundo plano, com inclinação de aproximadamente 2 cm em direção ao coletor principal de escoamento do líquido drenado, constituído por tubo dreno com diâmetro de 100mm, conforme o valor mínimo recomendado pela NBR 12209/1992.

Figura 8 – Impermeabilização das paredes internas e fundo do leito. Paragominas – PA.

Fonte: autores (2015).

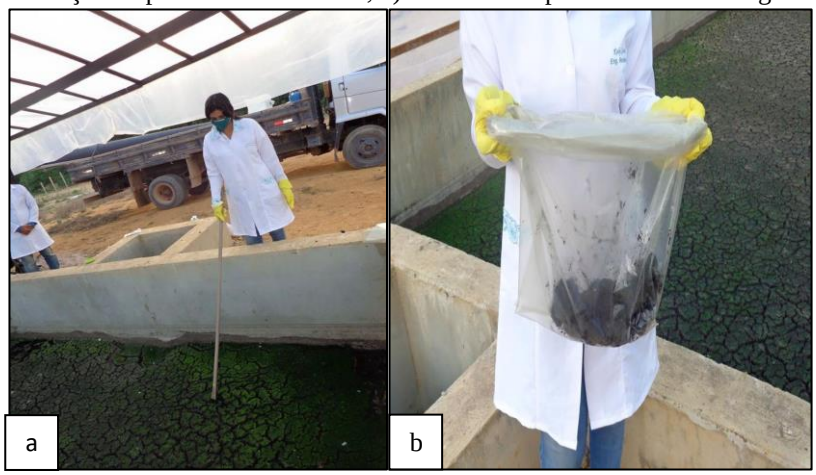
O descarte do lodo no leito é feito por queda livre sob a proteção de broquete com espessura de 6 cm, resistentes a operação de remoção do lodo seco, colocados com juntas de dois cm tomadas

com areia grossa. O sistema de drenagem do leito envolve um sumidouro instalado a 100 metros de distância do mesmo. Ressalta-se que o líquido drenado não foi objeto deste estudo.

PLANOS DE AMOSTRAGEM

As amostras foram coletadas em horários distintos do dia, seguindo a disponibilidade do técnico da Agência de Saneamento para acompanhar e permitir o acesso à área, a fase experimental para o primeiro ciclo compreendeu o período entre 29/04/2015 e 26/05/2015 e para o segundo ciclo compreendeu o período de 07/07/2015 encerrando em 03/08/2015. O procedimento de amostragem seguiu o item 4.2.5 da NBR 10.007 que estabelece os procedimentos de amostragem para resíduos sólidos. A composição amostral foi através da divisão do leito em quatro pontos, em uma rede quadriculada imaginária, conforme sugerido na norma referida. Desse modo, de cada área foi retirada uma amostra simples do lodo, com auxílio de uma pequena pá, confeccionada para este fim (Figura 9a). Em seguida, as amostras simples eram homogeneizadas e quarteadas de forma a obter uma amostra composta representativa (Figura 9b).

Figura 9 – a) Utilização da pá em coleta de lodo; b) amostra composta coletada. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015)

Para a realização das coletas foi utilizada caneca amostradora para o lodo em fase líquida no momento da descarga do efluente no leito de secagem, e nas demais coletas utilizou-se pá coletora, baldes, e frascos de vidro para coleta. Ressalta-se que antes e depois de cada coleta, todos os instrumentos eram lavados em água corrente e higienizados com álcool 70% v/v. Já os recipientes de acondicionamento eram previamente esterilizados, com a finalidade de evitar qualquer contaminação das amostras.

Na ausência de um laboratório especializado no município de Paragominas, para a análise de todos os parâmetros necessários, as amostras foram encaminhadas à Belém, e distribuídas entre um laboratório central (Multianálises) e laboratórios de apoio. Desse modo, foram necessários à utilização de diversos frascos de vidro (Figura 10), com preservação por refrigeração adequada até o momento do recebimento pelos laboratórios envolvidos.

Figura 10 – Frascos de vidro utilizados para acondicionamento das amostras. Paragominas – PA.

Fonte: autores (2015).

As amostragens atenderam o previsto para um período máximo de 24 horas, desde o momento da coleta no leito de secagem até o recebimento das amostras pelo laboratório central para início das análises. As análises dos parâmetros substâncias inorgânicas, estabilidade, potencial agronômico e indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos obedeceram às determinações do Anexo II da Resolução CONAMA 375/2006.

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DA HIGIENIZAÇÃO DO LODO

Os parâmetros analisados visando caracterizar a higienização do lodo obedeceram aos itens estabelecidos no § 5º da Resolução CONAMA 375/2006:

- Foram analisadas as concentrações de bactérias coliformes termotolerantes e os resultados expressos em número mais provável por grama de ST (NMP/g ST).
- Ausência e/ou presença de bactérias *Salmonella sp.* sem quantificação.
- Quantidade de ovos viáveis de helmintos sem especificação de espécies ocorrentes.

A Resolução CONAMA 375/2006 estabelece a verificação do parâmetro de vírus entéricos, no entanto este não foi avaliado devido à dificuldade de serviços laboratoriais envolvendo esse item no estado do Pará, que implicaria em alto custo para envio das amostras para outra região do país. As amostras para verificação dos parâmetros microbiológicos foram analisadas semanalmente, buscando monitorar o comportamento gradativo das colônias no leito de secagem (Tabela 9).

Tabela 16 – Parâmetros para agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos. Paragominas – PA.

Item	Parâmetros	Laboratório	Frequência de análises
Agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos	Coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella*	Multianálises	7 em 7 dias

Fonte: autores (2015).

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DO DESAGUAMENTO DO LODO

O desaguamento do lodo foi analisado através da verificação semanal dos parâmetros de umidade, sólidos totais e voláteis (Tabela 10). O laboratório responsável e a frequência com que as análises foram realizadas

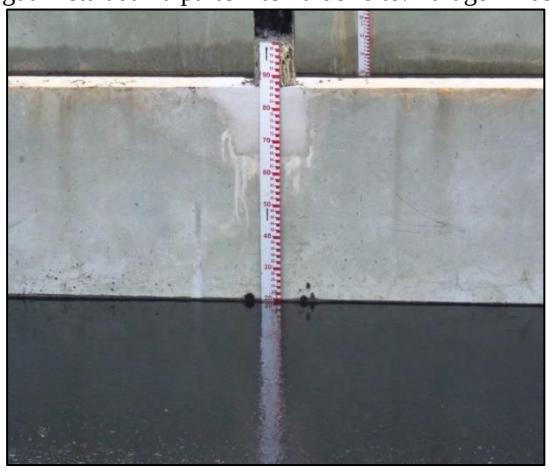
Tabela 17 – Parâmetros para estabilidade. Paragominas – PA.

Item	Parâmetros	Laboratório	Frequência de análises
Estabilidade	Umidade, sólidos voláteis, sólidos totais e pH.	Multianálises	7 em 7 dias

Fonte: autores (2015).

Além dessa caracterização foi observado ainda o decréscimo da lâmina de lodo colocada no leito, através do monitoramento realizado com uma régua instalada na parte interna da mureta (Figura 11).

Figura 11 – Régua instalada na parte interna do leito. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS E DE POTENCIAL AGRONÔMICO

- Substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas

As substâncias inorgânicas analisadas correspondem ao § 2º da Resolução CONAMA 375/2006, referente às substâncias mais comuns de serem encontradas no meio e que podem representar algum risco de contaminação no solo e recursos hídricos. Deste modo, esse item foi analisado inicialmente no lodo bruto coletado no momento do despejo em leito de secagem e no fim de cada monitoramento, visando verificar a influência do processo do tratamento nas características iniciais do produto.

- Potencial agronômico

As substâncias presentes neste item apresentam propriedades relevantes ao uso agrícola do lodo de esgoto, deste modo, o monitoramento tem como objetivo constatar os benefícios da introdução do composto para reuso agrícola (Tabela 11).

Tabela 11 – Parâmetros para substâncias inorgânicas e potencial agronômico. Paragominas – PA.

Item	Parâmetros	Laboratório	Frequência de análises
Substâncias inorgânicas	Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Selênio (Se), Molibdênio (Mo) e Zinco (Zn).	Multianálises	28 dias – início e fim do monitoramento
Potencial agronômico	carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, nitrogênio total, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total,	Multianálises	28 dias – início e fim do monitoramento

Fonte: autores (2015).

CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO DO EXPERIMENTO

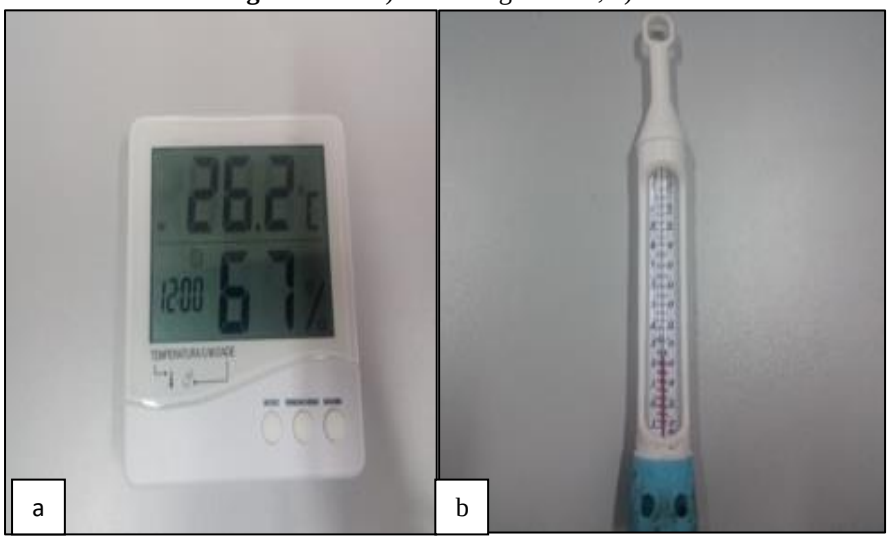
A literatura em geral relacionada ao estudo do desaguamento e higienização de lodo de esgoto em leitos de secagem indica que as condições meteorológicas da região influenciam nos processos referidos. Entretanto, a grande maioria das pesquisas similares foi realizada em outras regiões do Brasil, tendo a necessidade de monitorar condições climáticas, como forma de possibilitar a compreensão dos dados obtidos com os experimentos na região de Paragominas e circunvizinhança.

Deste modo, foram monitorados semanalmente no momento das coletas, com o uso de termo higrômetro (Figura 12a), usado para mensurar a temperatura e umidade do ar:

- Faixa de medição de temperatura para escala interna = 0°C à +50°C (32ºF a 122ºF)
- Faixa de medição de temperatura para escala externa = -50°C à +70°C (-58ºF a 158ºF).
- Além da escala de umidade = 15% a 95% UR, com precisão de ±1°C/ºF / ±5% UR.

O termômetro (Figura 12b), foi utilizado para mensuração de três temperaturas: interna e externa à estufa e do lodo. Para esta, utilizou-se um termômetro, marca Incoterm, cuja escala varia entre -10 ºC a +110°C, com limite de erro equivalente a ± 2.0°C. Ambos os aparelhos são da marca Inconterm.

Figura 125 – a) Termo higrômetro; b) termômetro.



Fonte: autores (2015).

Vale ressaltar que devido à área não conter segurança, os equipamentos não puderam ser fixados na estrutura do leito, de modo que eram levados no momento das coletas. Além dos fatores citados, considerou-se também a precipitação acumulada mensal para o município de Paragominas, para o período do experimento, conforme dados disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015).

TRATAMENTO ESTATISTICO DOS DADOS

Os dados obtidos foram tratados estatisticamente como o uso de planilhas eletrônicas contidas no *software* Excel 2010 (MICROSOLFT CORPORATION, 2010), para tabulação e composição gráfica. Além da aplicação da Estatística Descritiva com cálculos das médias de temperatura interna e externa apresentadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MONITORAMENTO DA TEMPERATURA, UMIDADE DO AR E PRECIPITAÇÃO

A análise dos dados obtidos indicou que, no primeiro ciclo, período chuvoso (29/04/2015; 06, 13, 20 e 26/05/205), e período seco (07, 14, 21, 28/07 e 03/08/2015) o monitoramento semanal da temperatura interna e externa e umidade interna e externa ao leito de secagem com cobertura plástica (estufa) apresentaram tendências de variações entre os valores para as médias obtidas (Tabela 12).

Tabela 12 – Temperatura interna e externa e umidade interna e externa à estufa nos dias de coleta (a) para o ciclo 1 e (b) para o ciclo 2. Paragominas – PA.

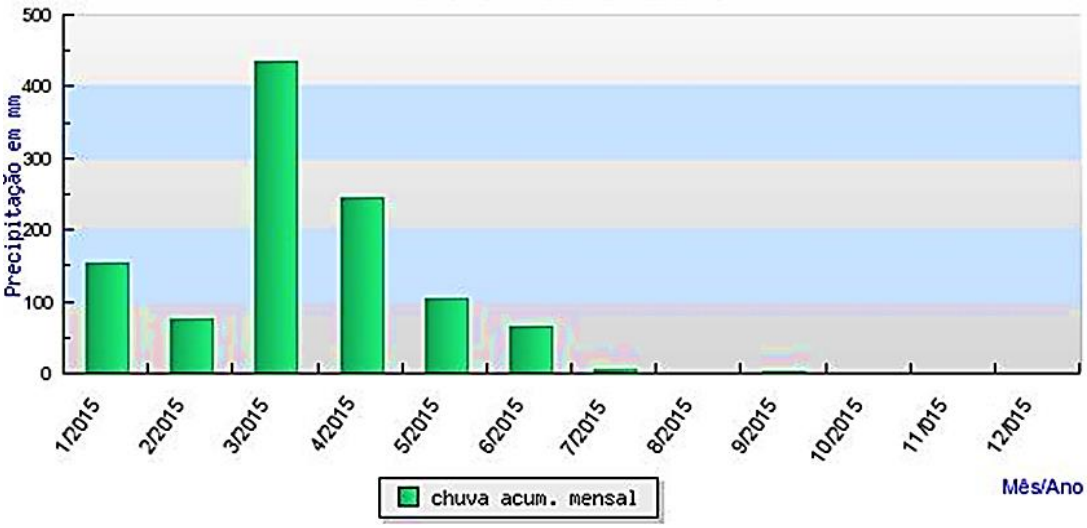
Períodos Analisados	Temperatura (°C)		Umidade (%)	
	Interna à estufa	externa à estufa	Interna	externa
(a) Chuvoso ($\overline{x}$)	32,08	31,62	67,80	66,40
(b) Seco ($\overline{x}$)	35,08	33,60	65,80	62,60

Fonte: autores (2015).

Os dados analisados indicaram que a temperatura média no interior e no exterior do leito de secagem foi menor para o ciclo do período chuvoso. Em contrapartida a umidade média interna (67,89%) e externa (66,40%) à estufa foi maior nesse período. Acerca dessas tendências de variações, Borges *et al.*, (2009) realizaram uma pesquisa e indicaram que o processo de secagem do lodo nos leitos é fortemente influenciado pela temperatura ambiente e pela umidade relativa do ar. Desse modo, as condições ambientais do segundo ciclo de monitoramento foram mais favoráveis a secagem do lodo.

Em relação à taxa de precipitação acumulada mensal, em 2015, no município onde se desenvolveu esta pesquisa, os dados obtidos indicaram que, para o primeiro ciclo de monitoramento, as taxas de precipitação variaram, pois, m abril, a taxa equivaleu a 200 mm e, em maio, 100 mm. Em contrapartida, para o segundo ciclo, a precipitação acumulada mensal para os meses de julho e agosto, foi considerada muito pequena, ou seja, abaixo de 50 mm (Figura 13).

Figura 13 – Precipitação acumulada mensal em 2015. Paragominas – PA

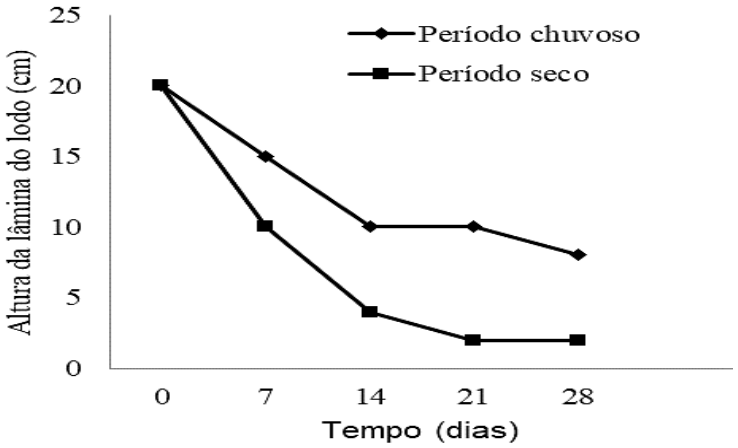


Fonte: INMET (2015)

MONITORAMENTO DA TEMPERATURA E UMIDADE DO LODO

O monitoramento da temperatura e umidade do lodo em processo de secagem foi realizado a cada sete dias. Nesse mesmo período, efetuou-se o monitoramento da umidade do lodo nos dois ciclos (Figura 14).

Figura 14 – Comparação do teor de umidade do lodo no período chuvoso e seco. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

Os dados obtidos indicaram que os valores para a umidade inicial do lodo nos dois ciclos mostraram tendência à similaridade (87,3%) em ambos os períodos analisados. No entanto, observa-se que o lodo de descarte do segundo ciclo (período seco) apresentou tendência a diminuição no 28º dia (8,98%). Em contrapartida, o lodo de descarte do primeiro ciclo (período chuvoso), os valores da umidade na 2ª e 4ª coletas, evoluíram (+3%). Tal fato pode ser justificado pela entrada de água da chuva no leito, uma vez que no período inicial do primeiro ciclo o mesmo não possuía proteção frontal plástica.

Acerca da redução da umidade, Jordão e Pessoa (2005), realizaram pesquisa e os dados que obtiveram, indicaram que, em climáticas favoráveis, o lodo poderá ser removido do leito de secagem num período de aproximadamente 20 dias, com o teor de umidade em torno de 70 a 60% em Esses dados obtidos para o desaguamento do lodo em leitos de secagem mostram-se condizentes com aqueles encontrados naquela pesquisa.

Vale ressaltar que a redução da umidade é um fator relevante na redução da concentração de ovos de helmintos da massa de lodo, entretanto, outras condições como temperatura e radiação solar também são fundamentais para a completa inviabilização dos ovos (THOMAZ-SOCCOL *et al.*, 1999). Sob condições favoráveis é possível reduzir a umidade do lodo a níveis inferiores a 10%, inviabilizando a sobrevivência de organismos patogênicos (PEDROSA *et al.*, 2006). Deste modo esse parâmetro é de extrema importância, pois influencia diretamente na higienização do lodo.

Quanto a relação entre a temperatura e umidade do lodo a análise dos dados indicou que, no período seco (segundo ciclo), a média da temperatura do lodo atingiu valor superior à média da temperatura no período chuvoso (primeiro ciclo). Sendo a temperatura máxima registrada de 37 ºC no período seco e de 32 ºC no período chuvoso (Tabela 14).

Tabela 14 – Relação entre temperatura e umidade do lodo no ciclo chuvoso e seco. Paragominas – PA.

Períodos	Temperatura (°C)	Umidade (%)
	Médias	
Chuvoso	29,8	82,2
Seco	32,6	61,3

Fonte: autores (2015).

No estudo sobre inviabilização de agentes patogênicos efetuado por Andreoli *et al.* (20001), eles concluiram que, para ocorrer a inviabilização de alguns agentes patogênicos é necessário que o lodo atinja uma temperatura de pelo menos 55 ºC com tempo de exposição de no mínimo 60 minutos.

Outro fator que provoca isso, foi indicado na pesquisa realizada por Pedrosa (2010). Nesta, os dados indicaram que a inativação térmica de 99,9 % de ovos viáveis em biossólidos digeridos são necessários aproximadamente um tempo de exposição de 32 minutos a 58 ºC. Na pesquisa realizada em Marabá, a tendência de variação para mais ou para menos não foi registrada temperatura nesta faixa, todavia, não se pode afirmar que o lodo não a atingiu, uma vez que o monitoramento da temperatura foi realizado apenas semanalmente e em algumas coletas a temperatura ambiente era amena em virtude do horário.

INFLUÊNCIA DA TAXA DE SÓLIDOS TOTAIS NO DESAGUAMENTO DO LODO

Os dados obtidos a analisados para o desaguamento do lodo, indicaram que houve um valor de massa ST mais elevado no primeiro ciclo quando comparado com o segundo, embora a altura inicial do lodo em ambos os ciclos tenha similaridade (Tabela 15).

Tabela 15 – Cálculo da taxa de Sólidos Totais aplicada nas duas descargas de lodo. Paragominas – PA.

Descarga	Altura inicial do lodo (cm) (1)	Teor de sólidos (%) (2)	Volume (L) (3) = (1) x S x 10	Massa ST (Kg.ST) (4) = (2) x 10^{-2}x (3) x 1,06	Taxa de ST (Kg.ST/m^2) (5) = (4) / S
1ª ciclo	20	13,4	10000	1420,4	28,408
2ª ciclo	20	12,7	10000	1346,2	26,924

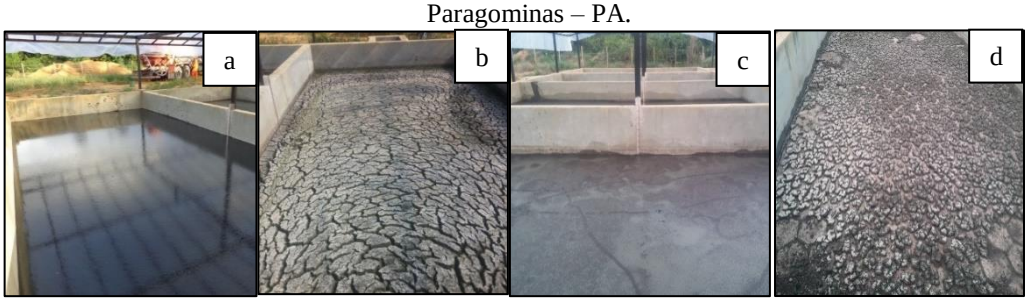
Nota: S = área do leito de secagem = 50 m^2

Fonte: autores (2015).

A taxa de sólidos totais aplicada tem influência direta na umidade final do lodo, de modo que quanto maior a taxa aplicada mais tempo é necessário para se atingir uma umidade final desejada. Assim, para condições climáticas mais amenas em que o desaguamento é mais demorado é recomendado que seja feita uma taxa de aplicação baixa. Entretanto, em virtude das temperaturas elevadas registradas no município de Paragominas optou-se pelo experimento utilizando uma taxa de aplicação maior do que a recomendada pela norma brasileira (NBR-570,1990) que estabelece 15Kg.ST/m^2. Para a primeira descarga utilizou-se uma taxa de aplicação igual a 28,408Kg.ST/m^2 e para segunda uma taxa de 26,924Kg.ST/m^2.

A redução de volume do lodo no primeiro ciclo chegou a 60% no 28º dia de coleta, uma vez que a altura da lâmina de lodo passou de 20 cm, no início do monitoramento (Figura 19a) para 8 cm, no final (Figura 19b). No segundo ciclo, a redução do volume do lodo foi mais significativa (Figura 19c), e atingiu 90% no 28º dia de coleta, sendo que a altura da lâmina passou de 20 cm, no início para 2 cm no final do monitoramento (Figura 19d).

Figura 19 – aspectos do lodo, no primeiro ciclo, (a) fase inicial, (b) final; no segundo ciclo, (c) fase inicial e (d) final. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

Esses dados estão próximos dos valores encontrados por Gonçalves *et al.* (2001), em estudo realizado em escala piloto com teste de percolação, na região da Grande Vitória – ES, onde utilizou-se taxas de aplicação de 73 e 24 kg ST/m^2 e por um período de aproximadamente 22 dias obteve redução de volume do lodo na faixa de 62% até 85%, respectivamente.

A RELAÇÃO SV/ST

Aos dados obtidos e analisados para a relação de sólidos voláteis e sólidos totais nos dois ciclos de monitoramento, indicaram uma tendência de elevação no valor médio da relação SV/ST, no período chuvoso, quando comparado ao seco (Tabela 16).

Tabela 16 – Relação entre SV e ST nas amostras de lodo nos dois ciclos. Paragominas – PA.

Período	Dias	Relação SV/ST (%)	pH
Período chuvoso	29/04/2015	44,40	8,20
	06/05/2015	88,91	7,10
	13/05/2015	94,10	6,70
	20/05/2015	60,00	6,97
	26/05/2015	50,00	5,80
$\bar{x}$	---------	**67,49**	**6,5**
Período seco	07/07/2015	60,15	8,52
	14/07/2015	5,36	6,56
	21/07/2015	24,46	7,07
	28/07/2015	50,78	5,05
	03/08/2015	48,15	5,89
$\bar{x}$	----------	**37,85**	**6,6**

Fonte: autores (2015).

Nota-se oscilações nos resultados semanais para a relação SV/ST, isso pode ser explicado pela forma de amostragem e homogeneização das amostras. Além disso, para o primeiro ciclo, o aumento considerável de SV verificado nas coletas do dia 06/05/2015 e 13/05/15 pode ter ocorrido devido a entrada de água da chuva, que provocou aumento da umidade do lodo.

Observa-se que no primeiro ciclo ocorreu o aumento na relação entre SV/ST quando observado a primeira e última coleta, onde os valores passaram de 44,40 para 50,00%, mesmo assim o valor final foi menor que o estabelecido na Resolução CONAMA 375/2006, que determina o valor de estabilidade inferior a 70% para lodo destinado ao reuso agrícola. No que diz respeito ao segundo ciclo a relação entre SV/ST quando observado a primeira e última coleta, sofreu uma redução, apesar das oscilações no decorrer do experimento. Desse modo, o valor final obtido para a estabilidade do lodo foi igual a 48,15%, novamente compatível com o que determina a referida Resolução.

A estabilidade do lodo nos dois ciclos de monitoramento foi comprovada pela ausência de odores nos leitos de secagem. Esses resultados comprovam a atuação eficaz do leito de secagem com cobertura plástica no processo de estabilização do lodo de ETE. Resultados semelhantes foram conseguidos por Lima (2010) sendo que esta obteve valores de até 36,9% na relação SV/ST para o lodo sem adição de cal, apenas submetido ao tratamento em leitos de secagem do tipo estufa agrícola em forma de leiras.

POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

A análise dos dados obtidos para o pH, indicou que houve tendência ao equilíbrio nos valores médios para os dois ciclos de monitoramento. Nota-se que o pH inicial e final do lodo para os dois ciclos de monitoramento apresentou valores aproximados (8,20 no início do período chuvoso e 8,52 no início do seco; e 5,80 ao final do período chuvoso e 5,89 ao final do período seco (Tabela 17).

Tabela 17 – Variações do pH nos dois ciclos. Paragominas – PA.

Período	Dias	pH
Período chuvoso	29/04/2015	8,20
	06/05/2015	7,10
	13/05/2015	6,70
	20/05/2015	6,97
	26/05/2015	5,80
$\bar{x}$	----------	**6,93**
Período seco	07/07/2015	8,52
	14/07/2015	6,56
	21/07/2015	7,07
	28/07/2015	5,05
	03/08/2015	5,89
$\bar{x}$	----------	**6,62**

Fonte: autores (2015).

Verificou-se que durante o período de monitoramento, nos dois ciclos, ocorreram oscilações para o valor de pH nos dois ciclos, mas a tendência geral foi de decréscimo. Isso pode estar associado a atividade microbiana que atua na massa de lodo realizando a decomposição da matéria orgânica, nesse processo são liberadas substâncias que tornam o meio mais ácido.

INDICADORES BACTERIOLOGICOS E AGENTES PATOGENICOS

SALMONELLA SP.

Os dados obtidos a analisados para *Salmonella* sp., indicaram que, nos dois ciclos de monitoramento, houve presença (P) em duas (uma no período chuvoso e uma no período seco) das 10 coletas analisadas (Tabela 18).

Tabela 18 – Resultados para o parâmetro *Salmonella sp*. durante os dois ciclos do experimento. Paragominas – PA.

Período	Dias	*Salmonella sp.* (1)	Umidade (%)	Temperatura (°C)
Período chuvoso	29/04/2015	A	86,60	32
	06/05/2015	A	90,20	27
	13/05/2015	A	79,10	32
	20/05/2015	A	90,07	30
	26/05/2015	P	65,50	28
Período seco	07/07/2015	A	87,30	27,9
	14/07/2015	A	78,00	28
	21/07/2015	P	36,60	34
	28/07/2015	A	14,90	36
	03/08/2015	A	8,98	37

Fonte: autores (2015).

É possível observar que de um modo geral houve ausência de *Salmonella sp.* ao longo do período de monitoramento para os dois ciclos; porém na última coleta do primeiro ciclo foi detectada a presença em 25 g de amostra. O art. 11 da Resolução CONAMA 375/2006 estabelece a ausência em 10 g de ST da amostra para enquadrar o lodo como Classe A.

Com relação ao lodo do segundo ciclo, a análise dos dados indicou presença de *Salmonella sp.* apenas na terceira coleta, sendo que o valor não foi quantificado pelo laboratório. No entanto, ao final do monitoramento indicou-se ausência dessa bactéria, confirmando o enquadramento do lodo monitorado no segundo ciclo como Classe A, da Resolução citada. Acerca dessas bactérias, Lima

(2010) realizou pesquisa e os dados por ele obtidos indicaram ausência de *Salmonella sp.* ao 28º dia de monitoramento com umidade do lodo em torno de 21%.

Já no estudo que Lozer (2012) efetuou, houve a presença da bactéria *Salmonella sp.* em várias amostras, tanto em leitos cobertos quanto em leitos descobertos, tal fato pode ser justificado, segundo a autora, pelos seguintes fatores: a temperatura máxima da massa de lodo não alcançou a faixa de 55 ºC por no mínimo 30 minutos; ocorrência de recrescimento devido as condições ambientais favoráveis durante o experimento, com temperaturas médias em torno de 32°C nos leitos de secagem; recontaminação por agentes externos tais como pássaros e outros animais.

Dessa forma, o aparecimento de *Salmonella sp*. na última coleta do primeiro ciclo e na terceira do segundo pode estar associado a um daqueles fatores, uma vez que a área onde encontra-se o leito de secagem em estudo, possui presença de aves e outros animais, e a temperatura média do lodo registrada não atingiu a temperatura ótima recomendada para a inviabilização dessas bactérias.

QUANTO AOS COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Em relação aos coliformes termotolerantes, os dados obtidos indicaram que para o parâmetro microbiológico, o lodo dos dois ciclos já foi depositado no leito com quantidade de coliformes termotolerantes aceitáveis (Tabela 19), para ser utilizado como insumo agrícola, pois o art. 11 da Resolução CONAMA 375/2006 estabelece o valor de coliformes termotolerantes < 10^3 NMP/g de ST.

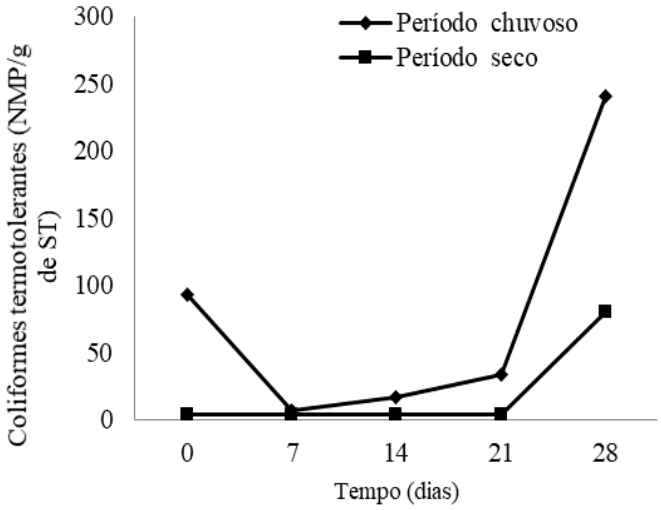
Tabela 19 – Resultados para o parâmetro coliformes termotolerantes nos dois ciclos de monitoramento. Paragominas – PA.

Período	Dias	Coliformes termotolerantes (NMP/g)	Umidade (%)	Temperatura (°C)
Período chuvoso	29/04/2015	93,0	86,60	32
	06/05/2015	7,0	90,20	27
	13/05/2015	17,0	79,10	32
	20/05/2015	34	90,07	30
	26/05/2015	240	65,50	28
Período seco	07/07/2015	3,6	87,30	27,9
	14/07/2015	-	78,00	28
	21/07/2015	3,6	36,60	34
	28/07/2015	3,6	14,90	36
	03/08/2015	80	8,98	37

Fonte: autores (2015).

Ao longo do período de monitoramento houve oscilação nos valores de coliformes termotolerantes, sendo que ao final dos dois ciclos, o valor de coliformes termotolerantes identificado foi superior ao valor da primeira coleta. O aumento registrado no número de coliformes para os dois ciclos pode estar associado a recrescimentos, pois, assim como a bactéria *Salmonella sp*., as bactérias coliformes termotolerantes multiplicam-se diante de condições ideais de temperatura e umidade (Figura 20).

Figura 20 – evolução de densidade populacional de C. termotolerantes nos dois ciclos analisados. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015).

De acordo com Comparini (2001) essas bactérias possuem fato que pode ter contribuído para o recrescimento dos coliformes é a temperatura registrada ter permanecido inferior a 50 ºC por no mínimo 60 minutos, condição necessária para inviabilização das bactérias (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2003).

Vale ressaltar que o valor de 240 NMP/g obtido na última coleta do primeiro ciclo de monitoramento pode estar associado ao decréscimo do pH do lodo, fato responsável por criar condições favoráveis ao aumento da concentração de coliformes termotolerantes (ROCHA, 2009). Mesmo tendo havido o recrescimento das bactérias, os valores finais para esses parâmetros nos dois ciclos permaneceram dentro do estabelecido na referida Resolução, enquadrando-se como Classe A.

Lima (2010) estudando leitos de secagem com configuração de estufa agrícola obteve um lodo Classe A para o parâmetro coliformes termotolerantes no 28° dia de monitoramento com umidade média de 21% para o ciclo 1, e no 14° dia de monitoramento com umidade em torno de 64% no ciclo 2. Segundo os autores Carrington (2001) e Kone *et al*. (2007), a redução acelerada dos teores de umidade da massa de lodo é um fator positivo para a inativação dos microrganismos, porém, por si só não se configura como fator suficiente para a redução dos patógenos do lodo.

QUANTO AOS OVOS VIÁVEIS DE HELMINTOS

Os dados obtidos e analisados para helmintos, indicaram que no lodo depositado em leito, em ambos os ciclos ocorreram ausência de ovos desses parasitas. Todavia, houve indicada da presença de larvas de *Strongyloides stercoralis* (15000 por amostra) no 28º dia (Tabela 20).

Tabela 20 – Resultados da contagem de ovos viáveis de helmintos. Paragominas – PA.

Período	Dias	Ovos viáveis de helmintos (ovo/g de ST)	Umidade (%)	Temperatura (°C)
Período chuvoso	29/04/2015	Ausência	86,60	32
	06/05/2015	Ausência	90,20	27
	13/05/2015	Ausência	79,10	32
	20/05/2015	Ausência	90,07	30
	26/05/2015	Presença	65,50	28
Período seco	07/07/2015	Ausência	87,30	27,9
	14/07/2015	Ausência	78,00	28
	21/07/2015	Ausência	36,60	34

28/07/2015	Ausência	14,90	36
03/08/2015	Ausência	8,98	37

Fonte: autores (2015).

Sobre essa espécie, estudo realizado por Lozer (2012), concluiu que a quantidade de ovos viáveis desses helmintos foi majoritária, representando 83% dos resultados de todas as amostras analisadas. Em outro estudo, Veloso *et al*. (2008), concluiram que a estrongiloidíase é uma infecção parasitária intestinal produzida pelo mesmo nematódeo e predomine em crianças, em qualquer idade. Em Paragominas, a presença de larvas desse helminto pode causar tal patologia nas crianças residentes na localidade objeto dessa pesquisa.

Quanto ao segundo ciclo, a análise dos dados obtidos indicou ausência de ovos viáveis de helmintos em todas as análises. Esses dados permitem a classificação da água como Classe A, em obediência ao contido no art. 11 da Resolução CONAMA 375/2006 determina que o lodo deve apresentar ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST para enquadrar-se nessa classe.

Lima (2010), no ciclo 3, alcançou o padrão Classe A no 14º dia de monitoramento para a leira com altura de 20 cm, sendo a umidade do lodo igual a 80,44%. Nos ciclos 1 e 2 o lodo digerido já apresentava quantidades de ovos viáveis de helmintos abaixo de 0,25 ovo/g de ST.

Já Comparini (2001) em estudo com estufa agrícola não detectou ovos viáveis no lodo a partir dos seguintes tempos de secagem e taxas de umidade: aos 71 dias com umidade igual a 12,87% (1ª repetição); aos 56 dias, com umidade igual a 28,58% (2ª repetição); aos 70 dias, com umidade igual a 11,45% (3ª repetição). Dessa forma, constata-se que foram necessários tempos maiores que 28 dias para que o lodo adquirisse características para ser enquadrado como Classe A, no que diz respeito ao parâmetro ovos viáveis de helmintos.

SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Os dados obtidos e analisados quanto à relação a caracterização química do lodo, indicaram a presente de quatro parâmetros não detectados, e sete com valores entre 2,95 a 47,00 mg/kg, entre o início e final de cada ciclo (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultados substâncias inorgânicas. Paragominas – PA.

	Período chuvoso		**Período seco**	
	Monitoramentos			
Parâmetro	**Início**	**Fim**	**Início**	**Fim**
	---------- (mg/Kg) ----------			
Arsênio	Não detectado	1,18	0,61	1,19
Bário	2,95	51,20	75,20	57,80
Cádmio	Não detectado	0,4634	0,67	0,47
Chumbo	1,10	20,30	26,90	19,50
Cobre	14,50	217	399	204
Cromo	1,49	21,60	19,40	18,50
Mercúrio	Não detectado	0,28	0,28	0,19
Molibdênio	0,26	4,39	7,81	5,15
Níquel	0,80	13,00	17,70	18,30
Selênio	Não detectado	1,14	1,72	0,93
Zinco	47,0	689	1114	650

Fonte: autores (2015).

A análise dos dados obtidos indicou que a concentração das substâncias inorgânicas no lodo para os dois ciclos esteve abaixo da concentração máxima permitida pela Resolução CONAMA 375/2006. Dessa forma, quanto a esses parâmetros, o lodo dos dois ciclos enquadra-se como Classe A.

A concentração desses elementos varia enormemente em função da sua origem e do processo de pré-tratamento que o lodo foi submetido (SANTOS *et al.*, 2011). Deste modo, as baixas concentrações encontradas podem estar associadas a origem doméstica do lodo monitorado e ao pré-tratamento realizado nos reatores UASB.

Desse modo, podemos afirmar que o reuso agrícola do lodo, quando esse apresenta concentrações de substâncias inorgânicas compatíveis com as determinadas na Resolução, constitui-se como uma forma barata e ambientalmente viável de disposição final, uma vez que, segundo Melo e Marques (2000) o lodo aplicado ao solo possibilita o aumento da disponibilidade destes elementos, que permitirá a ciclagem de nutrientes pelas plantas, a melhoria na fertilidade do solo e o aumento na produtividade das culturas.

POTENCIAL AGRONÔMICO

Os dados obtidos para os teores médios dos parâmetros de interesse agronômico que foram monitorados no início e no final de cada ciclo. No entanto, destaca-se que a Resolução CONAMA 375/2006 não determina valores específicos para os parâmetros de relevância agronômica. Por isso, observa-se que, no ciclo realizado no período chuvoso, houve maior tendência de variação entre os valores iniciais e finais dos parâmetros avaliados, já no ciclo realizado no período seco, a tendência dos valores para as concentrações finais, de modo geral, são semelhantes com as iniciais.

Em relação ao teor de carbono orgânico, a análise dos dados obtidos indicou que houve tendência de acréscimo ao final dos dois ciclos de monitoramento. Sobre isso, Bettiol *et al.* (2006), efetuaram estudo e concluiram que valores encontrados para o teor de Corg no lodo proveniente de duas ETE's localizadas no estado de São Paulo, foram superiores aos valores encontrados neste trabalho, isso porque aqui, utilizou-se relação C/N (Tabela 22).

Tabela 22 – Resultados dos parâmetros de interesse agronômico do lodo de ETE. Paragominas – PA.

Parâmetro	**Período mais chuvoso**		**Período menos chuvoso**	
	Início do monitoramento	Fim do monitoramento	Início do monitoramento	Fim do monitoramento
	----------(g/Kg) ----------			
Carbono orgânico	24	42	24	32
Fosforo (P)	0,155	2,82	4,34	3,52
Nitrogênio Total	9,7	9,41	10,8	17,7
Nitrogênio amoniacal	Não detectado	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Nitrato	0,00142	0,0263	0,0151	0,00364
Nitrito	0,00834	0,0006	0,00309	0,0122
Potássio (K)	0,037	0,6	1,04	0,7
Sódio (Na)	0,054	0,052	0,70	0,40
Enxofre (S)	0,381	5,45	8,9	7,9
Cálcio (Ca)	-	9,09	12,23	13,07
Magnésio (Mg)	0,081	4,87	2,901	2,05
Relação C/N	2,5/1	4,5/1	2,2/1	1,8/1

Fonte: autores (2015).

Na análise dos dados obtidos, verificou-se que a matéria orgânica apresenta um estado de degradação avançada da lignina, o que favorece o uso do lodo no solo para diferentes culturas (SILVA; MENDONÇA, 2007). Já o nitrogênio total não apresentou variações consideráveis ao longo do monitoramento e apresentou valores inferiores aos encontrados por Bettiol e Camargo (2006), porém esse resultado não interferiu negativamente na relação C/N.

Os valores dos parâmetros médios do lodo para o final dos ciclos, quando o lodo apresentou menor teor de umidade, se comparados aos de autores como Bettiol *et al*. (2006) apresenta similaridade com relação aos seguintes parâmetros: potássio, sódio, enxofre, cálcio e magnésio.

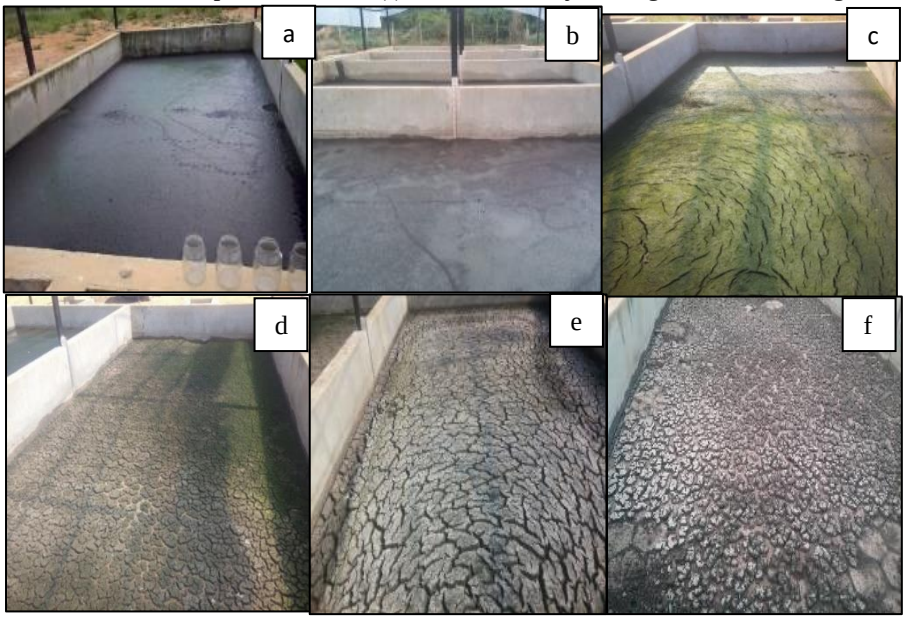
Segundo Bittencourt *et al*., (2009) o uso de lodo de ETE na agricultura é uma das principais alternativas de destino final para esse resíduo a nível mundial.

Essa aplicação possibilita melhorar as condições físico-químicas e biológicas dos solos por meio da adição de matéria orgânica e nutrientes existentes no lodo, aumentar a resistência do solo à erosão, diminuir os efeitos negativos dos períodos de estiagem durante a safra, pois o solo adquire maior capacidade de retenção de umidade, fornece nutrientes para as plantas, aumentar a produtividade agrícola, reduzir os custos de produção dos agricultores, pois diminui-se o uso de adubos químicos, contribuir para o desenvolvimento da agricultura familiar e reduzir os impactos ambientais decorrentes da inadequada disposição final de lodo de esgoto.

ASPECTO VISUAL, ODOR E PROLIFERAÇÃO DE VETORES

Em relação ao aspecto visual do lodo nos dois ciclos de monitoramento podemos observar semelhança na coloração do lodo em ambos os ciclos no decorrer do experimento. Na primeira semana do monitoramento o lodo apresentava coloração escura tanto em extensão (Figura 21a) quanto em largura (Figura 21b). No entanto, na segunda semana observou-se que o lodo adquiriu rachaduras e coloração verde escura (Figura 21c), todavia não houve uniformidade na coloração (Figura 21d). Por isso, ela foi sendo reduzida gradativamente (Figura 21e), até atingir a coloração cinza claro, a partir da terceira semana (Figura 21f).

Figura 21 – primeira semana, aspectos do lodo no (a) Vista frontal, no primeiro ciclo; (b) vista lateral no segundo ciclo; (c) segunda semana, vista frontal do primeiro ciclo; d) segundo ciclo; terceira semana**:** (e) vista frontal com rachaduras sem ladrilhamento no primeiro ciclo; (f) ladrilhamento já no segundo ciclo. Paragominas – PA.

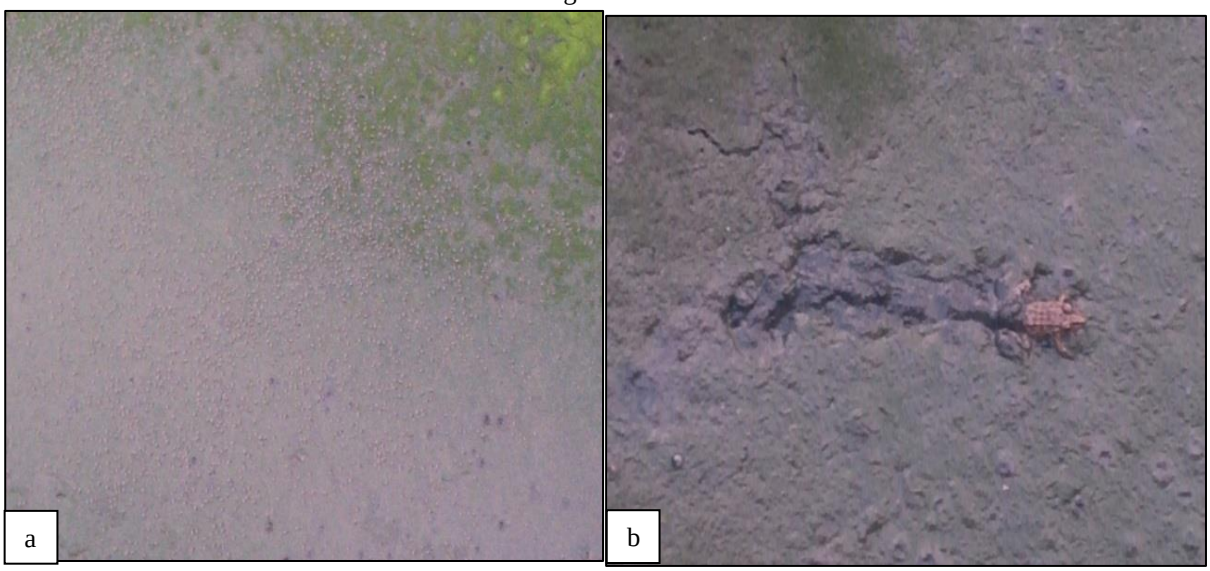


Fonte: autores (2015).

Com relação ao aspecto odor, o lodo monitorado nos dois ciclos não gerou odores. Constatou-se que o lodo proveniente do Reator UASB já se apresentava estável, uma vez que não foi sentido odor desagradável desde o descarte do lodo no leito de secagem até o final do monitoramento, o que comprova a eficiência do sistema de tratamento no processo de estabilização do lodo.

No que diz respeito ao aspecto proliferação de vetores foi observado no primeiro ciclo o aparecimento de larvas de moscas (Figura 22a) e presença de anfíbios (Figura 22b), sendo que a presença destes últimos pode ser justificada pela facilidade de entrada dos mesmos no leito que está localizado em área com presença significativa de vegetação.

Figura 22 – Aparecimento de: a) de larvas de moscas no primeiro ciclo; b) animais no leito de secagem. Paragominas – PA.



Fonte: autores (2015)

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os valores para as médias da temperatura e a umidade, internas, ou seja, na estufa, foram maiores quando comparados com aqueles da temperatura e umidade externa à estufa, em ambos os ciclos de monitoramento. Vale ressaltar que a média das temperaturas interna e externa à estufa foi maior no período seco, e a umidade externa à estufa foi maior no período chuvoso.

O lodo monitorado no período menos chuvoso apresentou menor teor de umidade final, alcançando 8,98%. Já a média da temperatura alcançada pelo lodo foi maior no período menos chuvoso, sendo 32,58 ºC. O lodo de ambos os ciclos de monitoramento apresentou valor de estabilidade final dentro do recomendado pela Resolução CONAMA 375/2006, enquadrando-se como Classe A, com relação SV/ST inferior a 0,70.

De modo geral, os valores para o item indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos apresentou bons resultados, sendo que o lodo do segundo ciclo pôde ser enquadrado como Classe A, obtendo ausência de *Salmonella sp*., concentração de Coliformes Termotolerantes igual a 80 NMP/g e ausência de ovos viáveis de helmintos.

O lodo dos dois ciclos de monitoramento apresentou valores de substâncias inorgânicas inferiores ao limite máximo determinado pela Resolução CONAMA 375/2006, não representando riscos sanitários e ambientais para o reuso agrícola. A partir da análise dos parâmetros agronômicos conclui-se que o lodo pode ser disponibilizado no solo como fertilizante. Essa disposição caracteriza-se como uma boa opção sob o ponto de vista econômico e ambiental.

Em síntese, o estudo mostrou que o lodo analisado no primeiro ciclo, apesar de não ter sido enquadrado como Classe A para todos os parâmetros, pode ser destinado segundo o que recomenda a Resolução 375/2006 para reuso em cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, além da recuperação de áreas degradadas. Já o lodo do segundo ciclo, enquadrou-se como Classe A, tem uso mais abrangente que a Classe B, sendo seu uso proibido em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

Visando subsidiar novas pesquisas relacionadas ao tratamento de lodo proveniente de Reator UASB em leitos de secagem para fins de uso agrícola, recomenda-se:

- Analisar o líquido drenado, a fim de realizar a caracterização do efluente.

- Melhorar o filtro do leito de secagem, desobstruindo sujeiras e adequando à altura das camadas à NBR 12209/1992.
- Realizar o revolvimento do lodo durante o processo de secagem, ao menos uma vez por semana.
- Realizar testes de secagem e monitoramento do lodo utilizando uma lâmina superior a 20 cm de altura, e em períodos de monitoramento superiores a 28 dias.
- Desenvolver estudos comparativos utilizando os módulos do leito de secagem com cobertura e sem cobertura.
- Para o reuso agrícola do lodo, recomenda-se a correção do pH levando em consideração as características do solo e o que determina a Resolução CONAMA 375/2006.

REFERÊNCIAS

ABES, 2006. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 01-06. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/CLeverson.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2015.

AISSE, M. M.; ANDREOLI, F. N. Estudo da desidratação do lodo anaeróbio, obtido em reatores tipo RALF, através do uso de leito de secagem e de centrífugo tipo Decanter. **Revista Sanare**, Curitiba, v.11, n.11, p. 37-43, jan./jun. 1999.

ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez. **A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados**: viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais. 2010. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ANDREOLI, C. V. *et al.* Higienização do lodo de esgoto. In: _____. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 87-117.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Reciclagem agrícola de biossólidos: impactos e regulamentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais**... Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 21-24.

ARAUJO FILHO, Valdemar F. de. O PAC e o saneamento básico. **Revista Desafios do Desenvolvimento**. Ano 5, ed. 42, 2008. Disponível Em: <http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=934:catid=28&Itemid=23>. Acesso em 16 out. 2015.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1992. 12 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 570**: projetos de estações de tratamento de esgoto sanitário, 1990.

BETTIOL, W. *et al.* Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto: descrição do estudo. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p 17-23.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em sólidos agrícolas. In: _____. (Ed.). **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p 25-35.

BITTENCOURT, S. *et al.* Uso agrícola de lodo de esgoto, estudo de caso da Região Metropolitana de Curitiba. **REVISTA AIDIS**. v. 2, n. 1, p. 1-11, 2009.

BORGES, E. S. M., 2009. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.3, p. 337-346, jul./set. 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 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**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 de ago. 2006. Seção 1, p. 141-146.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2013. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 181 p.

CAMPOS, C. M. M. *et al.* Desenvolvimento e operação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) no tratamento dos efluentes da suinocultura em escala laboratorial. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1. p. 140-147. jan./fev., 2006.

CAMPOS, J. R. *et al.* **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999.

CARRINGTON, E. G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction.** Luxembourg: European Comunities, 2001. 44 p. (Final Report). Disponível em: < http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge_eval.pdf>. Acesso em 15 out. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* Reatores anaeróbios de manta de lodo. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 155-198.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: reatores anaeróbios. v. 5. Belo Horizonte: Segrac, 1997.

COMPARINI, J. B. **Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólido submetidos à secagem em estufa agrícola.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P. Efeitos da secagem em estufa agrícola no decaimento de patógenos presentes em biossólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22.; FEIRA INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 5. Joinville, 2003. **Anais...** Joinville: FITABES, 2003. p. 1-39.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos. In: _____. **Agenda 21**. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 1997. cap. 21. p. 341-356.

DALTRO FILHO, J. *et al.* Desidratação de lodo em leito de secagem, na cidade de Aracajú-SE: resultados preliminares. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 1994, Florianópolis. **Anais**... Florianópolis-SC: ABES, 1994. p.447-466.

FAGUNDES, T. S**. Uso de polímero natural a base de amido como auxiliar de floculação no pós-tratamento de efluentes UASB com flotação por ar dissolvido**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2010.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 29-56.

FERREIRA, A. C. **Monitoramento da secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem com uso de estufa plástica e biogás**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Departamento de Solos do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. In: LARA, A. I. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999b. p. 8-17.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto. In: LARA, A. I. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999a. p. 21-26.

GONÇALVES, R. F. *et al*. Desidratação de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 57-86.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros em 01.07.2014**. 2014.

ILHENFELD, R. G. K. *et al.* Fatores limitantes. In: LARA, A. I. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999. p. 41-61.

INMET. INSTITUTO DE METEOROLOGIA. **Estações e dados**: estações automáticas – gráficos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em 21 out. 2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005.

KELM, T. A. *et al.* Avaliação do uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto na estabilização de materiais para pavimentação - Universidade Federal do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2014, Goiás. 8p.

KONE, D. *et al.* Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. **Water Research**, v. 41, p. 4397-4402, 2007.

LARA, A. I. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999c. p. 18-20.
.
LEONETI, A. B. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**. Rio de Janeiro, n. 45, p. 331-348, mar./abr. 2011.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOZER, J. G. **Desaguamento e higienização de lodo de esgoto utilizando estufa agrícola sobre leitos de secagem**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de estação de tratamento de esgotos na agricultura**: estudo de caso no município Rio das Ostras – RJ. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Saúde Pública). Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, 2001.

MELO, W.J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Coord.) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa do Meio Ambiente, 2000. cap. 5, p.109-141.

MIKI, M. K. *et al*. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgoto – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C.V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 49-107.

MICROSOFT CORPORATION. Excel. Disponível em:

PEDROSA, E. C. L. *et al.* Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 109-158.

PEDROSA, M. M. *et al.* Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 149-160, jul./dez. 2010.

PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C.V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro:

PINTO, M. A. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V. *et al* (Ed.). **Lodo de esgoto**: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 6, 2001 cap. 6, p. 261-296.

PONTES, P. P. Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador. 2003. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

ROCHA, A. L. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio por meio alcalino: Estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – GO**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Goiânia, 2009.

SANEPAR. AGÊNCIA DE SANEAMENTO DE PARAGOMINAS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Paragominas**, 2014.

SANTOS, L. M. *et al.* Determinação do potencial agrícola do lodo de esgoto por meio de análises físico-químicas e microbiológicas. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 06, n. 1, 2011.

SEPOF. Portal da Amazônia 02/02/2007. **Paragominas, município do Pará**. Disponível em: <http://www.portalamazonia.com.br/secao/amazoniadeaz/interna.php?id=637>. Acesso em 22 out. 2015.

SILVA, J. E. Alternativa agronômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, Meio Ambiente, 2000. p. 143-151.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, Eduardo de Sá. Matéria orgânica no solo. In: NOVAIS, R. F. *et al* (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa – MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p. 275-374.

TCHOBANOGLOUS, G. *et al.* **Wastewater engineering**: treatment and reuse. 4th ed. Metcalf & Eddy. Inc. New York: McGraw-Hill, 2003.

THOMAZ-SOCCOL, V. *et al.* Agentes patogênicos: helmintos e protozoários. In: ANDREOLI, C. V. *et al.* (Org.). **Reciclagem de biossólidos**: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR/FINEP, 1999, cap. 3, p.156-174.

VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 07-28.

VAN HAANDEL, A. C.; CAVALCANTI, P. F. F. Geração e composição de lodo em sistemas de tratamento de esgotos sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. p. 3-27.

VELOSO, M. G. P. *et al.* Hiperinfecção por Strongyloides stercoralis: relato de caso autopsiado. **Rev. Soc. Bras. Med. Trop**. v. 41, n.4, p. 413-415, 2008.

VON SPERLING, M. *et al.* Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V. *et al.* (Ed.). **Lodo de esgoto**: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 6, 2001, p. 484.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Rio de Janeiro: ABES, 2002.

ZANATTA, M. C. K. **Caracterização da toxicidade de lodos de estação de tratamento de esgoto com vistas a sua aplicação agrícola**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP, 2014.

Antonia Michelle Araújo Lopes
Engenheira Ambiental

Rayssa Magalhães da Silva
Engenheira Ambiental
Companhia de Saneamento de Paragominas
Gerente de Controle de Qualidade

Herenildo Aguiar Maciel
Engenheiro Ambiental
Companhia de Saneamento de Paragominas
Superintendente Geral

Aline Souza Sardinha.
Engenheira Sanitarista
Universidade do Estado do Pará
Departamento de Engenharia Ambiental
alinesardinha@uepa.br