

II-331 - AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE BANHEIRO SECO SEPARADOR E PROCESSOS DE TRATAMENTO DE FEZES E URINA HUMANAS

Maria Elisa Magri ⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutora em Engenharia Ambiental pelo Programa de Engenharia Ambiental da UFSC (PPGEA/UFSC). Pós-doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biociências (PPGBiotec/UFSC). Professora do Depto de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Joceli Gorrezen Zaguini Francisco

Formada em ciências contábeis pela Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALE). Técnica Ambiental pelo Centro Educacional Professor Padre Quirino (POSITEC). Bolsista Apoio Técnico CNPq.

Richard Eliers Smith

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela UFSC. Mestrando em Engenharia Ambiental pelo Programa de Engenharia Ambiental da UFSC (PPGEA/UFSC). Bolsista CAPES.

Fabício Jacques Vieira

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela UFSC. Pós-graduado em Gerenciamento de Projetos. Atuação em projetos, pesquisa e desenvolvimento na Reversa Engenharia e Consultoria.

Célia Regina Monte Barardi

Bióloga na modalidade médica pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). Mestre e Doutora em Ciências Biológicas pela UNIFESP. Pós-doutora pela Universitat de Barcelona e Macquarie University. Professora Titular do Depto de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia da UFSC.

Luiz Sérgio Philippi

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Saneamento Ambiental pela Université de Montpellier I (França). Pós-doutor pela Université de Montpellier II (França). Professor Voluntário do Depto de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Endereço ⁽¹⁾: Campus Universitário, Trindade - UFSC. Depto de Engenharia Sanitária e Ambiental - Florianópolis - SC - CEP: 88040-970. Brasil - Tel: + 55 (48) 3829.4515 e-mail: mariaelisamagri@yahoo.com.br

RESUMO

A potencialidade de reúso agrícola de excretas humanas vem sendo reconhecida mundialmente como uma questão de sustentabilidade ambiental. Salienta-se que há a necessidade de produção de um material estável aliada à inativação de patógenos, sendo estes os principais fatores que balizam as possibilidades de reúso. O objetivo deste trabalho foi apresentar a avaliação de um modelo de banheiro seco separador e de alternativas de tratamento das fezes e urina humanas que possibilitem a produção de um material seguro do ponto de vista sanitário, para que o reúso agrícola possa ser implementado. Foi implantado um banheiro seco com segregação de fezes e urina no Centro de Treinamento (CETRE) da Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), em Florianópolis/ Santa Catarina. Este banheiro foi avaliado em termos de aceitabilidade dos usuários e na eficiência do tratamento das fezes e urina humanas. O processo avaliado para o tratamento das fezes teve por objetivo a sua sanitização, e foi constituído pela adição de uma mistura de calcário, cinzas e uréia às fezes. O processo avaliado para a urina humana teve por objetivo avaliar sua eficiência na manutenção das concentrações de nutrientes, principalmente de nitrogênio e fósforo, pois estes elementos são facilmente “perdidos” por volatilização e precipitação, respectivamente. Os usuários de maneira geral relataram o uso do banheiro separador como satisfatório e não detectaram maus odores, insetos ou quaisquer outros inconvenientes. Com o processo de tratamento das fezes estudado e aqui proposto, 70 dias é o tempo que o material fecal necessita ficar armazenado em contato com os materiais adicionados. Neste período foi possível a inativação de 4 logs das bactérias e vírus avaliados. O armazenamento da urina humana se for realizado de forma estanque e evitando turbilhonamento, garante que as concentrações de nutrientes sejam mantidas no líquido por longos períodos de tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento focado em recursos, Banheiros secos, Fezes, Urina.

INTRODUÇÃO

Além da escassez de água e falta de saneamento, outro problema mundial que vem sendo amplamente discutido desde a última década é a “crise dos alimentos”. De acordo com o último relatório da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentos (FAO), 805 milhões de pessoas no mundo são diretamente afetadas pela falta de alimentos (FAO, 2014). Estes problemas podem culminar em sérias consequências para as populações, desde o aumento da fome, miséria e doenças, até guerras, desentendimentos entre países e grandes crises econômicas.

A crise dos alimentos ocorre principalmente nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento como consequência do aumento da demanda por fertilizantes em função do aumento populacional, aliado ainda à questão do desperdício, má distribuição e infertilidade dos solos.

A contribuição do saneamento para amenizar estes problemas pode ser muito importante, principalmente se este for direcionado ao reúso dos nutrientes que são normalmente descartados com as excretas humanas. Assim, o saneamento pode atuar no controle da poluição dos corpos hídricos, na promoção da saúde e no aumento da produção de alimentos pela disponibilização dos nutrientes presentes nos esgotos.

No Brasil, aproximadamente 134 milhões de pessoas não tem acesso à saneamento adequado, e destas, 8,2 milhões defecam à céu aberto (SNIS, 2012).

Um das formas mais eficientes de se fazer o aproveitamento dos nutrientes contidos nos esgotos é por meio da segregação das fezes e urina, pois nestas duas frações estão concentrados quase 100% do nitrogênio, fósforo e potássio. E a segregação das fezes e urina é possível com o uso de vasos sanitários secos projetados para permitir a separação destas frações de excretas. Os banheiros secos com vasos separadores estão se tornando cada vez mais populares em vários países, no entanto, seu uso, seu conforto, bem como o reúso das excretas humanas é questionado principalmente do ponto vista da seguridade sanitária.

A potencialidade de reúso das excretas está refletida nas normas existentes que tratam da questão, e salienta-se que a remoção de patógenos é foco em todas elas. Observa-se que a maioria das normas existentes trata do reúso de lodo de esgoto e produtos derivados, não se referindo diretamente às excretas humanas, tendo em vista que esta abordagem do saneamento é relativamente nova.

Nos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA) regulamenta o uso das excretas como lodo de esgoto. Ela classifica o lodo em duas categorias (Classe A e Classe B) de acordo com a qualidade do material tratado, e estabelece requisitos diferentes para cada uma delas baseados principalmente na concentração de patógenos (USEPA, 1994). No mesmo país o American National Standards Institute (ANSI) e National Sanitary Foundation (NSF) padronizam a qualidade de excretas para o reúso na instrução NSF/ANSI Standard 41, levando também em consideração a questão dos patógenos.

No Brasil, a Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos, e também o classifica em duas categorias de acordo com as concentrações máximas de agentes patogênicos em cada uma delas.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabeleceu diretrizes para a utilização de esgotos, excretas e águas cinzas na agricultura. As orientações variam conforme a aplicação do dejetos e os níveis de segurança exigidos (WHO, 2006).

Tendo como base as questões abordadas, reitera-se que a potencialidade de reúso de excretas humanas é reconhecida mundialmente como uma questão de sustentabilidade ambiental e está refletida hoje nas normas existentes que tratam da questão, algumas destas citadas anteriormente. Salienta-se que a necessidade de produção de um material estável aliada à obrigatoriedade de inativação de patógenos é foco em todos os documentos citados, sendo os principais fatores que balizam as possibilidades de reúso.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar a avaliação de um modelo de banheiro seco separador e de alternativas de tratamento das fezes e urina humanas que possibilitem a produção de um material seguro do ponto de vista sanitário, para que o reúso agrícola possa ser implementado.

MATERIAIS E MÉTODOS

IMPLANTAÇÃO DO BANHEIRO SECO SEPARADOR

Foi implantado um banheiro seco com segregação de fezes e urina no Centro de Treinamento (CETRE) da Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), em Florianópolis. O CETRE foi selecionado por realizar treinamentos diversos com agricultores de todo o estado, possuindo então, um elevado movimento de pessoas que podem entrar em contato com a tecnologia, e fazer a utilização voluntária do banheiro. Além disso, o CETRE é um espaço público aonde as pessoas podem circular durante a semana.

A segregação das fezes e urina no banheiro seco implantado é realizada por meio de um vaso sanitário separador e mictórios masculino e feminino. Nenhuma unidade funciona com a utilização de descargas sanitárias convencionais. No vaso sanitário separador, após defecar, deve-se colocar uma porção de aditivo (material para a secagem e tratamento das fezes) no compartimento das fezes, e após urinar, deve-se apenas borrifar água no compartimento da urina. Neste trabalho foi estudado um aditivo (mistura de calcário agrícola, cinzas e uréia) com o objetivo específico de sanitização das fezes (item apresentado na sequência do texto). Nos mictórios deve-se também somente borrifar água após o uso. As figuras 01, 02 e 03 apresentam as unidades implantadas.

O compartimento de acúmulo de fezes é composto por um contentor plástico de 50 L com uma tubulação de ventilação acoplada, e os contentores de urina são contentores de 40 L.



Figura 01: Banheiro seco separador implantado.



Figura 02: Vaso sanitário separador.



Figura 03: Mictórios masculino e feminino.

AValiação DE ASPECTOS FUNCIONAIS E DE ACEITAÇÃO DA TECNOLOGIA

Este banheiro foi avaliado durante um período de 5 anos, aonde foram observadas as seguintes questões:

1. Uso do banheiro. Neste item foram avaliados aspectos referentes à facilidade do uso por parte das pessoas, aonde foram verificados: i – o correto uso do aditivo, ii – a limpeza das instalações, principalmente do vaso sanitário separador;
2. Problemas com odor. Neste item foi avaliada a liberação de maus odores na área interna do banheiro em função do compartimento de acúmulo e tratamento das fezes e urina humanas;
3. Aceitação dos usuários.

Estas questões foram avaliadas por meio da aplicação de questionários com os usuários e inspeções periódicas nas instalações de acordo com critérios pré-definidos. Além disto, a avaliação de liberação de odores foi complementada com a realização de análises *in loco* de gases com grande potencial odorante, no caso H₂S, CH₄ e NH₃ (equipamento Extreme GasAlert Micro®).

SISTEMA DE TRATAMENTO DAS EXCRETAS HUMANAS IMPLANTADO E AVALIADO

Tendo como base trabalhos previamente realizados em escala laboratorial (Magri et al., 2012) foram implementados no banheiro seco em escala real um sistema de tratamento das fezes humanas secas e um sistema de tratamento da urina humana.

O tratamento das fezes humanas foi baseado no processo de secagem combinado com tratamento químico por meio da elevação da concentração da amônia não ionizada e íons carbonato no material. Este tratamento foi implantado de forma que o processo ocorra dentro do próprio compartimento de acúmulo de fezes, sendo que os aditivos necessários para o processo constituem o material adicionado após cada defecação pelos usuários.

Este material (chamado aqui de aditivo) foi composto por uma mistura de cinzas, calcário agrícola e uréia, sendo que o papel das cinzas foi a elevação do pH das fezes, e a função do carbonato de cálcio (calcário) e uréia foi a elevação das concentrações de íons carbonato e amônia não ionizada, respectivamente. Os íons carbonato e amônia não ionizada têm sido utilizados em pesquisas recentes na inativação de microorganismos patogênicos em matrizes como fezes humanas, animais e lodo de esgoto (Magri et al., 2012; Vinnerås et al., 2013).

O tratamento da urina humana foi realizado por meio da estocagem simples. Com a estocagem a uréia presente na urina inicia imediatamente o processo de hidrólise aonde há também a elevação do pH e consequentemente a elevação da concentração da amônia não ionizada. Este processo da mesma forma como foi descrito anteriormente para as fezes humanas, promove a inativação de microorganismos patogênicos. A urina humana excretada pela maioria das pessoas é estéril, com a exceção dos casos em que haja infecção com alguns microorganismos que são excretados na urina e não nas fezes, como *Schistosoma haematobium*, *Leptospira interrogans*, *Salmonella typhi* e *paratyphi* e Poliomavírus.

Assim, para a avaliação dos processos de tratamento citados, em escala real, foi monitorado o compartimento de acúmulo e tratamento de fezes humanas e o compartimento de estocagem de urina. Foram monitorados na sequência três contentores de fezes e três contentores de urina, isto para que os dados pudessem ser coletados e trabalhados em triplicatas.

O monitoramento foi realizado durante o período de enchimento dos contentores e após o mesmo, por mais 120 dias, no caso das fezes, e por 590 dias, no caso da urina. O objetivo da avaliação dos contentores de fezes foi a avaliação da sanitização do material, com a inativação de microorganismos indicadores e/ou patogênicos, enquanto o objetivo da avaliação dos contentores de urina foi analisar o comportamento dos nutrientes no sistema de armazenamento em longo prazo.

Foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas nas amostras coletadas nos contentores das fezes, sendo elas: potencial hidrogeniônico, umidade, sólidos totais, fixos e voláteis, *Enterococcus faecalis*, Coliformes totais, *Escherichia coli*, *Salmonella* sp. e Adenovírus humano tipo 2. Nas amostragens dos contentores de urina foram avaliados os parâmetros: pH, nitrogênio amoniacal, fósforo ortofosfato e sólidos em suspensão. As análises físico-químicas seguiram as recomendações do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), as análises de Coliformes totais, *E. coli* e *E. faecalis* foram realizadas com a metodologia de contagem de número mais provável com uso dos substratos Colilert® e Enterolert®, e os Adenovírus foram mensurados por técnica de cultura celular em células A549, integrada com PCR quantitativo em tempo real.

RESULTADOS

ASPECTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

O funcionamento do banheiro seco durante os 5 anos de monitoramento não apresentou nenhum problema que interrompesse sua utilização. Os maiores problemas detectados tem relação com o uso dos aditivos, os quais muitas vezes foram utilizados em muita quantidade, ou foram adicionados no compartimento da urina, ao invés do compartimento das fezes.

Os usuários de maneira geral relataram o uso do banheiro separador como satisfatório e não detectaram maus odores, insetos ou quaisquer outros inconvenientes. A análise dos gases in loco também não detectou a

presença de H_2S durante todo o período de monitoramento. O gás NH_3 foi detectado em pequenas concentrações, abaixo de 5ppm.

PROCESSOS DE TRATAMENTO DAS FEZES E URINA HUMANAS

FEZES HUMANAS

Como resultados principais pode-se destacar a eficiência do aditivo, primeiramente na função de evitar que maus odores fossem emitidos, e principalmente na inativação dos microorganismos patogênicos/indicadores monitorados nas fezes.

O processo de tratamento das fezes foi baseado na combinação dos fatores: secagem, elevação do pH, e elevação da concentração da amônia não ionizada (NH_3). A adição da mistura de calcário, cinza e uréia foi eficiente na otimização destes fatores, o que permitiu a formação de um produto final com um elevado percentual de sólidos totais (59%), baixo percentual de sólidos voláteis (25%) (figura 4), elevado pH (figura 5) e elevada concentração de amônia (tabela 1).

O elevado percentual de sólidos permite a aplicação das fezes no solo como um condicionador em estado sólido, facilitando sua aplicação, enquanto o baixo percentual de sólidos voláteis garante a baixa probabilidade de geração de odores desagradáveis e atração de vetores durante a aplicação.

O valor médio de pH das 3 bombonas (10,0) foi possível em função da adição do calcário e das cinzas, que são materiais alcalinos. No entanto, é importante destacar que na medida em que a uréia é hidrolisada são liberados íons hidrogênio, o que também eleva o pH, e quanto mais elevado o pH mais o equilíbrio entre as formas de íon amônio (NH_4) e amônia (NH_3) tende para esta última forma não ionizada, sendo este fator o principal responsável pela sanitização das fezes. Portanto, ressalta-se que a combinação destes fatores foi fundamental para o eficiente tratamento alcançado.

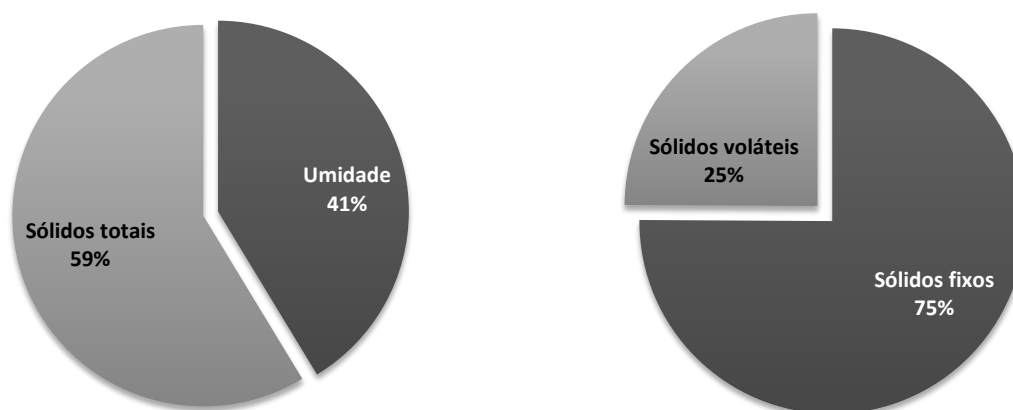


Figura 4. Valores médios em percentual (dados das 3 bombonas de fezes tratadas) de sólidos totais, umidade, sólidos fixos e sólidos voláteis.

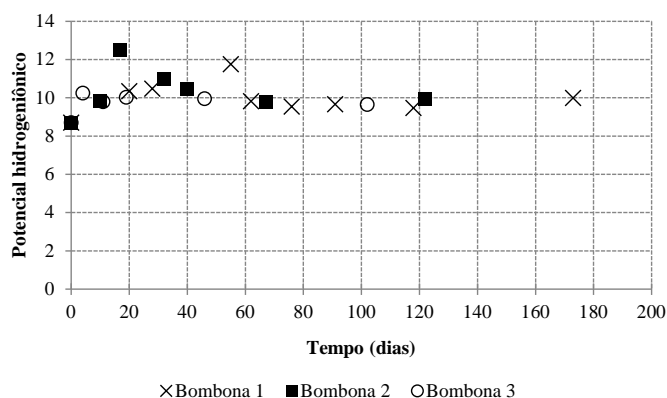


Figura 5. Variação temporal do pH durante o período de tratamento das fezes nas 3 bombonas.

Após o período de enchimento do compartimento com fezes e aditivos, foram necessários 70 dias para a redução de 4 unidades logarítmicas dos microorganismos avaliados, considerando o Adenovírus como o microorganismo limitante. A União Européia considera seguro o uso de 4 unidades logarítmicas de decaimento, em se tratando de sanitização de fertilizantes produzidos à base de dejetos de animais, desde que não se utilize os mesmos em culturas que podem ser ingeridas cruas. No entanto, estudos recentes indicam que pode ser necessária até a inativação de 7,5 logs de vírus em lodo fecal, para o reúso em culturas ingeridas cruas (Fidjeland, 2015).

A tabela 1 apresenta os dados das cinéticas de inativação de todos os microorganismos avaliados. As cinéticas foram calculadas por meio da aplicação de logaritmo na base 10 para todos os dados de concentração mensurados em laboratório, seguido pela linearização dos mesmos. Como dados são apresentadas as taxas de inativação em dias (k) e os respectivos tempos para a redução decimal (t90). Com os dados apresentados podem ser calculados os tempos de tratamento necessários para a inativação, de acordo com a redução logarítmica requerida.

Tabela 1. Dados das cinéticas de inativação dos microorganismos avaliados: *Enterococcus faecalis*, Coliformes totais, *Escherichia coli*, e Adenovírus humano.

	Temperatura do ar no período (°C)			NH3 (mM)	pH	<i>Enterococcus faecalis</i>			
	Média	Máxima	Mínima			k (dia ⁻¹)	t90 (dias)	R ²	N
Bombona 1	21,9	25,6	18,7	20,2	9,97	0,068	14,7	0,96	5
Bombona 2	23,8	27,9	20,5	30,9	10,3	0,103	9,7	0,86	5
Bombona 3	24,3	28,3	21,0	25,5	9,73	0,105	9,6	0,79	5
	Temperatura do ar no período (°C)			NH3 (mM)	pH	Coliformes totais			
	Média	Máxima	Mínima			k (dia ⁻¹)	t90 (dias)	R ²	n
Bombona 1	21,9	25,6	18,7	20,2	9,97	0,134	7,4	0,96	4
Bombona 2	23,8	27,9	20,5	30,9	10,3	0,166	6,0	0,86	4
Bombona 3	24,3	28,3	21,0	25,5	9,73	0,302	3,3	0,91	4
	Temperatura do ar no período (°C)			NH3 (mM)	pH	<i>Escherichia coli</i>			
	Média	Máxima	Mínima			k (dia ⁻¹)	t90 (dias)	R ²	n
Bombona 1	21,9	25,6	18,7	20,2	9,97	0,111	9,0	0,92	4
Bombona 2	23,8	27,9	20,5	30,9	10,3	0,127	7,8	0,74	4
Bombona 3	24,3	28,3	21,0	25,5	9,73	0,146	6,9	0,81	5
	Temperatura do ar no período (°C)			NH3 (mM)	pH	Adenovírus humano			
	Média	Máxima	Mínima			k (dia ⁻¹)	t90 (dias)	R ²	n
Bombona 1	21,9	25,6	18,7	20,2	9,97	0,057	17,5	0,89	5
Bombona 2	23,8	27,9	20,5	30,9	10,3	0,117	8,6	0,95	4
Bombona 3	24,3	28,3	21,0	25,5	9,73	0,075	13,3	0,89	4

O comportamento das bactérias frente ao tratamento foi semelhante, com exceção da *Salmonella*. A *Salmonella* foi detectada na primeira amostragem, e após uma semana todas as análises realizadas sempre apresentaram valores nulos, ou abaixo do limite de detecção do método utilizado. Sendo assim esta bactéria não deve ser considerada como um bom indicador de eficiência do processo de tratamento, uma vez considerada sua elevada sensibilidade.

A inativação dos *E. faecalis*, coliformes totais e *E. coli* foi muito semelhante, sendo o *E. faecalis* a bactéria mais resistente. O tempo calculado pelos dados obtidos pela cinética resultou em 45 dias para a inativação de 4 unidades logarítmicas para esta última bactéria. Ressalta-se também que as taxas de inativação para as 3 bactérias foi sempre mais elevada quanto mais elevada foi a temperatura ambiente, e consequentemente, mais elevada a temperatura das fezes no interior das bombonas.

Os Adenovírus foram os microorganismos mais resistentes à inativação, sendo necessários no máximo 70 dias para a redução de 4 logs. Tendo isto como premissa recomenda-se a utilização de vírus ao invés de bactérias como indicadores da eficiência do processo de tratamento, ou ainda o uso de bactérias indicadoras, desde que somado um fator de segurança de tempo necessário à sanitização de fezes.

Não foi observada para os Adenovírus a mesma tendência das bactérias, da elevação da taxa de inativação com a elevação da temperatura, pelo menos nas pequenas variações de temperatura detectadas neste estudo.

Quando houver a presença ou risco da presença de protozoários e helmintos nas fezes coletadas em banheiros secos, deve-se considerar tempos de tratamento mais elevados, tendo em vista que estes microorganismos são reconhecidamente mais resistentes do que bactérias e vírus.

Ressalta-se ainda que as concentrações de amônia não ionizada encontradas foram essenciais para o tratamento, sendo que os tempos de tratamento aqui relatados são possíveis com as condições do estudo, sendo temperatura média entre 21 e 24°C, pH entre 9,7 e 10, e NH₃ entre 20 e 30 mM.

URINA HUMANA

Os dados apresentados como resultados são referentes aos valores médios das amostragens realizadas nos três tanques de armazenamento, que foram construídos e operados como triplicatas. A análise estatística de variância confirmou que sempre houve equidade entre os dados coletados. Todas as séries de dados obtidas por parâmetro tiveram distribuição normal.

A estocagem como tratamento da urina humana foi eficiente na inativação de microorganismos, sendo que em 30 dias não foi mais detectada a presença de coliformes totais, *Escherichia coli* e adenovírus humano.

Durante o armazenamento da urina as maiores variações de pH ocorreram no início do período avaliado (primeiros 100 dias), com valores entre 8,20 e 9,44. Avaliando-se todo o período o pH médio foi de $9,09 \pm 0,24$. Observa-se que as variações foram menores no período entre 100 e 590 dias, ou ainda, as maiores variações ocorreram nos primeiros meses de armazenamento (figura 6).

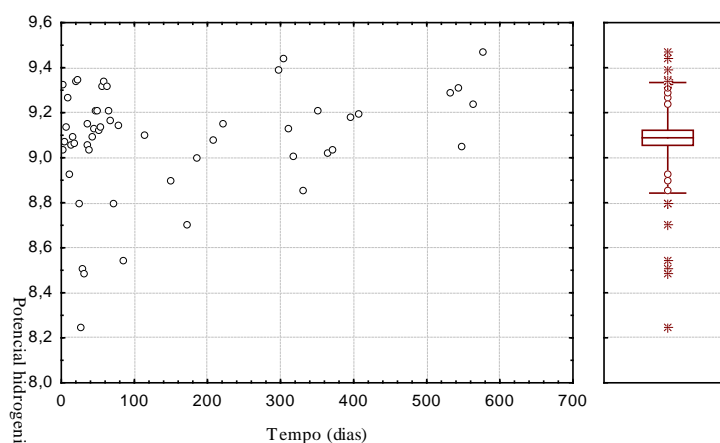


Figura 6. Variação temporal e box plot do pH (- média; □ erro padrão; I desvio padrão; ○ discrepantes; * extremos) nos tanques de armazenamento de urina.

A figura 7 apresenta a variação da concentração de amônia ionizada ao longo do período de monitoramento, bem como a média, erro e desvio padrão, dados discrepantes e extremos.

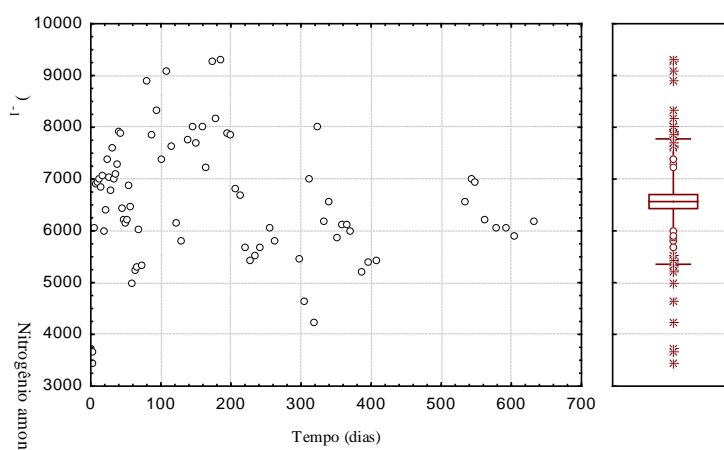


Figura 7. Variação temporal e *box plot* do N-NH_4^+ (- média; □ erro padrão; I desvio padrão; ○ discrepantes; * extremos) nos tanques de armazenamento de urina.

Ocorreram variações na concentração de amônia durante todo o período, com valores entre 3458 e 9300 mg.L^{-1} . Estas grandes variações não são normalmente reportadas em estudos com sistemas de armazenamento de urina, tendo em vista que a maioria deles apresenta dados dos primeiros 30 dias de monitoramento, onde ocorre a hidrólise da uréia. Os estudos reportam uma elevação da concentração de amônia até a “estabilidade”, não relatando a volatilização (UDERT et al., 2003; LIU et al., 2008). Este comportamento também foi observado neste estudo no primeiro mês de armazenamento. No entanto, com maior tempo de monitoramento observaram-se as maiores variações na concentração de amônia em função dos processos de volatilização e solubilização que ocorreram durante todo o período. Estes processos ocorreram em função do equilíbrio entre amônia ionizada e não ionizada que varia de acordo com alguns fatores, principalmente tempo, temperatura e pH. Estes fatores interferem consequentemente nos processos de volatilização e solubilização da amônia não ionizada, pois esta é formada a partir da amônia ionizada que é proveniente em sua maior parte da hidrólise da uréia.

A concentração de amônia ionizada aumentou linearmente com a elevação da temperatura, pois tanto a reação de hidrólise da uréia quanto a solubilidade da amônia aumentam com a elevação da temperatura. Como teoricamente a hidrólise ocorreu mais significativamente no primeiro mês de armazenamento, as variações na concentração de amônia ao longo dos 630 dias foram mais afetadas pelo segundo fator.

Pode-se destacar então, que em regiões onde existe variação significativa de temperatura nas estações do ano, como no sul do Brasil, a concentração de amônia solúvel na urina em tanques de armazenamento provavelmente irá variar ao longo do ano em função da temperatura. E destaca-se então que as temperaturas mais elevadas favorecem o aumento da concentração nos tanques. Entende-se com os dados aqui apresentados que há uma dinâmica de solubilização e volatilização que varia constantemente em função das variações de pH e temperatura.

As concentrações de ortofosfato variaram entre 116 e 776 mg.L^{-1} durante o período de monitoramento, sendo que a média foi de 419 mg.L^{-1} (figura 8). Este comportamento não é comumente reportado nos trabalhos existentes. No entanto, ressalta-se novamente que estes apresentam em sua maioria curtos períodos de monitoramento (UDERT et al., 2003; LIU et al., 2008).

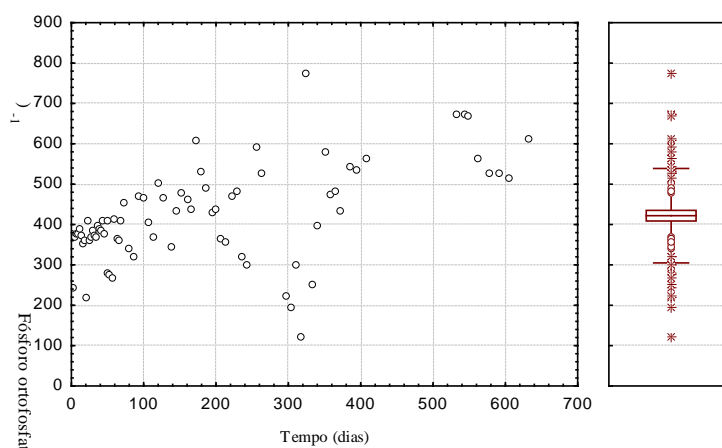


Figura 8. Variação temporal e *box plot* do $P-PO_4^{3-}$ (- média; □ erro padrão; I desvio padrão; ○ discrepantes; * extremos) nos tanques de armazenamento de urina.

Observa-se que durante os 100 primeiros dias de monitoramento a variação da concentração de ortofosfato foi menor, apresentando como média 368 mg.L⁻¹ e desvio padrão 56 mg.L⁻¹, o que se aproxima ao comumente reportado na literatura. No entanto, não houve uma redução na concentração ao longo do tempo proveniente do processo de precipitação.

É natural e esperado que ocorra a precipitação de fosfatos na forma de estruvita e hidroxiapatita em função da reação do mesmo com íons de magnésio e cálcio, respectivamente. Há a presença destes íons na urina humana, no entanto em baixas concentrações. E como a maioria dos trabalhos que reportam a precipitação fizeram a utilização de alguma fonte de água para diluição da urina, é muito provável que as concentrações de magnésio e cálcio foram elevadas e facilitaram a precipitação.

Como foi utilizada urina sem diluição no presente estudo, ou seja, houve limitação de íons de cálcio e magnésio, esta é a mais provável razão pela qual a precipitação de ortofosfato nos tanques foi baixa. Observa-se que também não houve grande variação (com exceção de dados extremos) e nem elevação da concentração de sólidos em suspensão nos tanques (figura 9), o que corrobora com a pouca formação de precipitados.

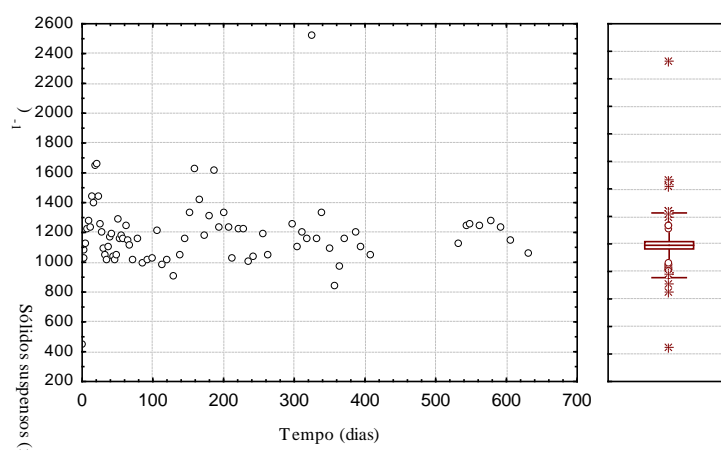


Figura 9. Variação temporal e *box plot* dos SS (- média; □ erro padrão; I desvio padrão; ○ discrepantes; * extremos) nos tanques de armazenamento de urina.

Ressalta-se que a não precipitação de fosfatos é uma vantagem do ponto de vista do reúso da urina líquida, pois as concentrações dissolvidas se mantêm mais estáveis, facilitando a absorção pelas plantas.

CONCLUSÕES

Com os dados coletados durante esta pesquisa foi possível esclarecer questões com relação ao potencial de reúso das fezes e urina humanas, e aos sistemas de armazenamento de urina e higienização de fezes aplicados a banheiros secos com separação. Os sistemas estudados mostram um grande potencial de aplicação tendo em vista a simplicidade dos processos e sua elevada eficiência na manutenção dos nutrientes, no caso da urina, e na sanitização, no caso das fezes, o que é essencial para que o uso da tecnologia e o reúso das excretas possa ser realizado de forma segura do ponto de vista da proteção ambiental e da saúde pública.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 2005. 1195 p.
2. 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. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 30 de ago. 2006.
3. LIU, Z.; ZHAO, Q.; WANG, K.; LEE, D.; QIU, W.; WANG, J. Urea hydrolysis and recovery of nitrogen and phosphorous as MAP from stale human urine. **Journal of Environmental Sciences** v.20, 2008. p. 1018-1024.
4. MAGRI ME, PHILIPPI LS, VINNERÅS B. 2012. **Inactivation of pathogens in faeces by desiccation and urea treatment for application in urine-diverting dry toilets**. *Appl Environ Microbiol* **79**: 2156-2163.
5. UDERT, K.M.; LARSEN, T.A.; GUJER, W. Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. **Water Research** v. 37, 2003. p. 2667-2677.
6. VINNERÅS, B. **Sanitation and hygiene in manure management**. In: Sommer, S.G., Jensen, L.S., Christensen, M.L., Schmidt, T. (eds). *Animal Waste – Recycling, Treatment and Management*. Wiley-Blackwell. Oxford UK (In Press). 2013.
7. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The State of Food Insecurity in the World**, Report (2014). Disponível em: <http://www.fao.org/publications/sofi/2014/en/>
8. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO (2012). Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>
9. USEPA. Standards for the use or disposal of sewage sludge. **EPA Part 503 Biossolids Rule**. Office of waste water management. Washington, 1994.
10. WHO. World Health Organization. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Vol 4. Geneva: World Health Organization. ISSN 4, 2006. 204p.