

Higienização de lodo de esgoto em reator com aquecimento solar: inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*

Sanitisation of sewage sludge in a solar heated reactor: inactivation of total coliforms and Escherichia coli

Odinei Fogolari¹, Maria Elisa Magri², Luiz Sérgio Philippi³

RESUMO

O uso de lodo de esgoto na agricultura se tornou prática corrente em diversos países, sendo atrativa em muitos aspectos, principalmente no fornecimento de matéria orgânica e nutrientes ao solo. Embora os benefícios ambientais e agrícolas do uso de lodo sejam consideráveis, tal prática deve ser realizada de forma sanitariamente segura. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de um processo de higienização térmica de lodo de esgoto utilizando energia solar. O lodo era aquecido através de um trocador de calor, construído com tubos de cobre e instalado dentro do reator, no qual circula água aquecida em coletores solares planos. Foram realizados 16 ensaios experimentais em diferentes condições de irradiação solar. A inativação térmica da *Escherichia coli* foi avaliada através do modelo cinético de primeira ordem em condições não isotérmicas. O processo mostrou-se eficiente em ensaios realizados com irradiação solar média do período acima de 500 Wh.m⁻², com redução de *E. coli* entre 4,2 e 7,1 log₁₀ e de coliformes totais entre 4,8 e 7,4 log₁₀. Os ensaios realizados em dias com menores índices de irradiação solar tiveram a eficiência de higienização comprometida, devido às baixas temperaturas atingidas pelo lodo.

Palavras-chave: energia solar; resíduos de saneamento; destinação agrícola; bio sólidos; cinética de inativação.

ABSTRACT

The application of sewage sludge in agriculture has become a common practice in many countries, which is attractive in many aspects, especially for the input of organic matter and nutrients in the soil. Despite the benefits of sludge use in agriculture and for the environment, this practice needs to be conducted considering safety aspects regarding sanitary conditions. In this context, the aim of this study was to evaluate the efficiency of a thermal disinfection process of sewage sludge using solar energy. The sludge was heated through a heat exchanger built with copper pipes and installed inside the reactor, in which water heated in flat plate solar collectors circulates. Sixteen experimental tests were performed under different solar irradiation conditions. The thermal inactivation of *Escherichia coli* in the reactor was evaluated using the first order kinetic model in non-isothermal conditions. The process proved effective in those tests with an average solar irradiation period above 500 Wh.m⁻², and the reduction of *E. coli* was between 4.2 and 7.1 units log₁₀, and between 4.8 and 7.4 units log₁₀ of total coliforms. When tests were conducted in days with lower levels of solar irradiation, the efficiency of sanitisation was compromised, due to the low temperatures reached by the sludge.

Keywords: solar energy; sanitation waste; agricultural destination; biosolids; inactivation kinetics.

INTRODUÇÃO

O uso de lodo de esgoto na agricultura traz benefícios principalmente ao solo, por ser uma fonte de matéria orgânica e nutrientes. Contudo, tal prática deve considerar aspectos sanitários a fim de evitar contaminação do solo e dos alimentos. A higienização do lodo antes de sua utilização é essencial, pois agentes patogênicos como os ovos de helmintos, fungos, vírus e colônias de bactérias estão presentes, podendo causar

danos à saúde humana (ARTHURSON, 2008; FYTILI; ZABANIOTOU, 2008; FIDJELAND *et al.*, 2013).

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 o classifica em duas categorias de acordo com as concentrações máximas de agentes patogênicos permitidos. Para o lodo Classe B é exigida concentração de coliformes termotolerantes inferior

¹Engenheiro Químico. Mestre em Engenharia Ambiental. Doutorando em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Florianópolis (SC), Brasil.

²Doutora em Engenharia Ambiental pela UFSC. Pesquisadora em estágio pós-doutoral no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC - Florianópolis (SC), Brasil.

³Doutor em Hidrologia e Saúde Pública pela Université de Montpellier I. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFSC - Florianópolis (SC), Brasil.

Endereço para correspondência: Odinei Fogolari - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina - Rua Delfino Conti, s/n - Trindade - Caixa Postal 476 - 88040-970 - Florianópolis (SC), Brasil - E-mail: fogolari@gmail.com

Recebido em: 27/11/11 - **Aceito em:** 22/12/16 - **Reg. ABES:** 75680

a 10^6 número mais provável por grama (NMP.g⁻¹) de sólidos totais (ST) e ovos de helmintos em número inferior a 10 ovos viáveis.g⁻¹ ST. O lodo Classe A deve apresentar concentração de coliformes termotolerantes inferior a 10^3 NMP.g⁻¹ ST, menos de 0,25 ovos viáveis de helmintos.g⁻¹ de ST, menos de 0,25 unidade formadora de foco (UFF) de vírus entéricos.g⁻¹ de sólidos totais (ST), além de ausência de *Salmonella* em 10 g de ST. Ressalta-se também a necessidade de controle de parâmetros relacionados às substâncias orgânicas e inorgânicas que apresentam risco potencial à saúde humana e podem estar presentes no lodo ou produto derivado (Brasil, 2006).

A United States Environmental Protection Agency, que regulamenta o uso de lodo de esgoto nos Estados Unidos (USEPA, 2003), assim como a Resolução Conama n° 375/2006, sugerem diversos processos para redução de patógenos em lodo de esgoto. Entre eles, a higienização térmica, como a pasteurização a 70°C por 30 minutos, que está classificada como um processo de redução adicional de patógenos.

A inativação térmica de microrganismos, utilizada em diversos segmentos da atividade humana, é explorada de muitas formas no tratamento de lodo, seja como complemento a outros tratamentos, ou mesmo atuando concomitantemente à estabilização da matéria orgânica em muitos processos que envolvem temperaturas termofílicas, como a digestão aeróbia e a compostagem, por exemplo.

A relação tempo-temperatura de inativação é específica para cada microrganismo e dependente das características do meio em que o organismo se encontra. Em meios mais nutritivos, com condições mais favoráveis à reprodução, há tendência de resistência do organismo aumentar. A higienização também pode falhar na eliminação de endósporos bacterianos, que muitas vezes são destruídos apenas em processos de esterilização. Em sistemas de grande escala, fatores operacionais também influenciam a eficiência do tratamento, como transferência de calor, cuidados no manuseio para evitar recontaminações e controle pós-tratamento para identificar possível recrescimento microbiano (Haug, 1993; PFLUG; HOLCOMB; GÓMEZ, 2001; VINNERÅS, 2007).

Diversos modelos preditivos de inativação térmica já foram desenvolvidos para matriz lodo de esgoto, sendo que cada um aborda uma situação específica para um determinado microrganismo (LANG; SMITH, 2008; AITKEN *et al.*, 2005; PECSON *et al.*, 2007; HAUG, 1993). Por isso, é necessária ampla variedade de estudos para obtenção de dados que sirvam de parâmetros para projetos de novos sistemas e elaboração de protocolos que possam garantir a qualidade e segurança do produto final.

Com base nos diferentes estudos já realizados, é possível observar que a taxa de inativação de cada microrganismo sofre variações de acordo com o método de determinação, temperatura de aquecimento e meio de dispersão (YUK *et al.*, 2009; SPINKS *et al.*, 2006). Ressalta-se ainda que, para a validação de qualquer processo de higienização térmica, é recomendável o monitoramento de diversos agentes patogênicos, visto que alguns microrganismos podem possuir considerável resistência

ao calor num determinado meio (MOCÉ-LLIVINA *et al.*, 2003). No entanto, em função dos elevados custos analíticos associados ao monitoramento da variedade de microrganismos patogênicos possíveis de estarem presentes no lodo de esgoto, é comum a utilização de microrganismos como *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Enterococcus faecalis* e bacteriófagos, por exemplo, como modelos e/ou indicadores da eficiência dos processos (BOUDAUD *et al.*, 2012; FIDJELAND *et al.*, 2013; VENGLOVSKY; MARTINEZ; PLACHA, 2006).

Em processos que utilizam unicamente a estabilização de lodo de esgoto, a redução de agentes patogênicos é variável e muitas vezes insuficiente para obtenção de produto Classe A. O uso de processos de estabilização da matéria orgânica, como a digestão anaeróbia e aeróbia, calagem ou compostagem, consorciado com processos de higienização térmica é uma opção promissora para produção de material seguro à utilização agrícola. Contudo, o uso de processos térmicos pode ter custo elevado, principalmente quando for utilizado vapor no aquecimento (Arthurson, 2008).

A principal desvantagem da higienização térmica do lodo é o consumo de energia. No entanto, o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento de energia solar permite a exploração de recursos térmicos para diversos fins, de forma sustentável.

Este artigo tem por objetivo avaliar a eficiência de um processo de higienização térmica de lodo de esgoto, utilizando energia de coletores solares planos e *Escherichia coli* e coliformes totais como indicadores de eficiência do processo. A cinética de inativação da *E. coli* foi modelada em condições não isotérmicas e os resultados comparados com os dados experimentais. O sistema de tratamento proposto faz uso de um arranjo simples que utiliza coletores solares planos para aquecer o lodo indiretamente, minimizando a utilização de recursos energéticos convencionais, como energia elétrica produzida a partir de fontes não renováveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado neste estudo foi proveniente de um tanque séptico instalado no Centro de Treinamento da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) em Florianópolis, Santa Catarina.

A caracterização do lodo bruto é apresentada na Tabela 1 e foi obtida de 15 amostragens realizadas entre dezembro de 2009 e setembro de 2010. O volume de lodo amostrado em cada coleta foi de aproximadamente 20 L. O lodo foi coletado com auxílio de bomba hidráulica submersa instalada no fundo do tanque séptico. As concentrações de *Escherichia coli* e coliformes totais no lodo bruto variaram na ordem de 10^3 a 10^5 NMP.mL⁻¹. O método empregado para quantificação de coliformes totais e *E. coli* foi o Substrato Definido Colilert® (o-nitrofenil-β-D-galactopiranosídeo (ONPG) e 4-metilumbeliferil-β-D-glucuronídeo (MUG)).

Ensaio de higienização de lodo de esgoto no reator com aquecimento solar

Componentes e descrição do processo

O reator de aquecimento utilizado possuía diâmetro interno de 0,9 m e altura de 1,0 m; foi construído com chapa de aço inoxidável AISI 304 e, externamente, com chapa de ferro galvanizado pintada de preto. Entre as duas chapas metálicas que compunham a parede do reator foi

introduzida uma camada de poliuretano expandido, servindo como isolante térmico. A espessura total da parede composta era de 10 cm. A tampa do reator foi confeccionada com chapa metálica, malha de fibra de vidro e placas de madeira e também possuía espessura de 10 cm.

Os coletores solares eram formados por uma caixa isolada termicamente contendo em seu interior um absorvedor e uma tubulação em cobre pintada de preto. Foram instalados cinco coletores solares planos conectados em série, sendo que cada um deles possui 1,90 m² de área útil de coleta e cobertura de vidro de 3 mm. Os coletores foram instalados com orientação no sentido norte, com grau de inclinação de 27°, aproximadamente igual à latitude do local, conforme indica Bezerra (1986).

O trocador de calor, construído com tubos de cobre e situado a uma altura de 10 cm do fundo do reator, cumpria a função de transferência de energia térmica ao lodo. A peça era composta por cinco tubos paralelos de 0,6 m de comprimento, 2 mm de espessura e diâmetro externo de 6 cm. Esses tubos eram associados em série com um conjunto de mais cinco tubos em paralelo, de mesmas dimensões.

O sistema possuía também: uma bomba automática de 265 W para circulação de água nos coletores solares e no trocador de calor, sensores de temperatura e uma caixa de fibra de vidro para recebimento do lodo após o tratamento térmico.

A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processo. Inicialmente, o lodo do tanque séptico era enviado ao reator térmico (1) por uma bomba hidráulica submersa (2), no qual ocorre o tratamento em batelada. Os coletores solares (3) e o trocador de calor (4) eram conectados e operavam em circuito fechado, tendo água como fluido de trabalho. A água circulava no sistema (coletores e trocador de calor) através de uma bomba automática (5), transferindo energia térmica ao lodo. Assim, o lodo era aquecido indiretamente pela energia solar. Toda a tubulação de transporte de água entre os coletores e o trocador de calor foi isolada com poliuretano expandido e fita isolante. Um controlador (6) acionava a bomba automática quando o diferencial de temperatura da água, entre a saída dos coletores e a saída do trocador de calor, era maior que 8°C. A bomba continuava acionada até que esse diferencial se reduzisse a 2,5°C. A temperatura do lodo era monitorada por três termopares instalados no interior do reator (7). Após o lodo receber o tratamento durante o tempo pré-estabelecido, era enviado a um tanque (8) onde permanecia até atingir a temperatura ambiente, aguardando destino final. A descrição do processo mais detalhada e com imagens pode ser encontrada em Fogolari (2011).

Procedimento dos ensaios de higienização de lodo no reator com aquecimento solar

Foram realizados 16 ensaios entre dezembro de 2009 e julho de 2010, de modo a contemplar diferentes condições meteorológicas:

Tabela 1 - Caracterização do lodo de esgoto do tanque séptico.

Parâmetro	Método	Mínimo	Máximo	Média±DP
pH	Potenciométrico - Standard Methods 2320 B (APHA; AWWA; WEF, 1998)	6,68	7,62	7,12±0,22
Alcalinidade (mg.L ⁻¹)	Titulométrico de líquido sobrenadante (SILVA, 1977)	24	511	236±177
DQO (mg.L ⁻¹)	Digestão em refluxo fechado - método colorimétrico - Standard Methods 5220D (APHA; AWWA; WEF, 1998)	2.300	26.175	14.253±8.014
Amônia (mg.L ⁻¹)	Colorimétrico de Nessler (Vogel, 1981)	21,4	120,5	70,6±30,6
Nitrato (mg.L ⁻¹)	Colorimétrico com brucina - Standard Methods (APHA; AWWA; WEF, 1998)	0,5	5,3	1,4±1,2
Ortofosfato (mg.L ⁻¹)	Método do Ácido Vanadomolibdato - Standard Methods (APHA; AWWA; WEF, 1998)	6,8	67,3	40,5±15,7
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico - secagem a 105°C (SILVA, 1977)	2.067	9.819	4.465±1.961
Sólidos totais voláteis (mg.L ⁻¹)	Método gravimétrico - calcinado a 550°C (SILVA, 1977)	879	4.930	2.035±1.013
Teor de sólidos totais voláteis (%)	Método gravimétrico - calcinado a 550°C (SILVA, 1977)	38,9	51,1	45,2±4,2
<i>E. coli</i> (NMP:100 mL ⁻¹)	Substrato Definido Colilert*	1,00E+04	1,26E+07	2,30E+06
Coliformes totais (NMP:100 mL ⁻¹)	Substrato Definido Colilert*	3,16E+05	2,51E+07	8,18E+06

DP: desvio padrão; DQO: demanda química de oxigênio; *E. coli*: *Escherichia coli*; NMP: número mais provável.

- céu aberto em diferentes épocas do ano, visando verificar a influência das mudanças sazonais na eficiência do processo — mudanças na incidência da radiação solar ao longo do ano;
- céu totalmente encoberto por nuvens no período mais quente do ano.

A Tabela 2 apresenta dados mínimos, médios e máximos de irradiação solar no período de realização de cada ensaio, além da insolação do dia e da temperatura média do ar no período do ensaio. Para fins de comparação da eficiência do tratamento, os ensaios foram agrupados em quatro condições meteorológicas: A, B, C e D.

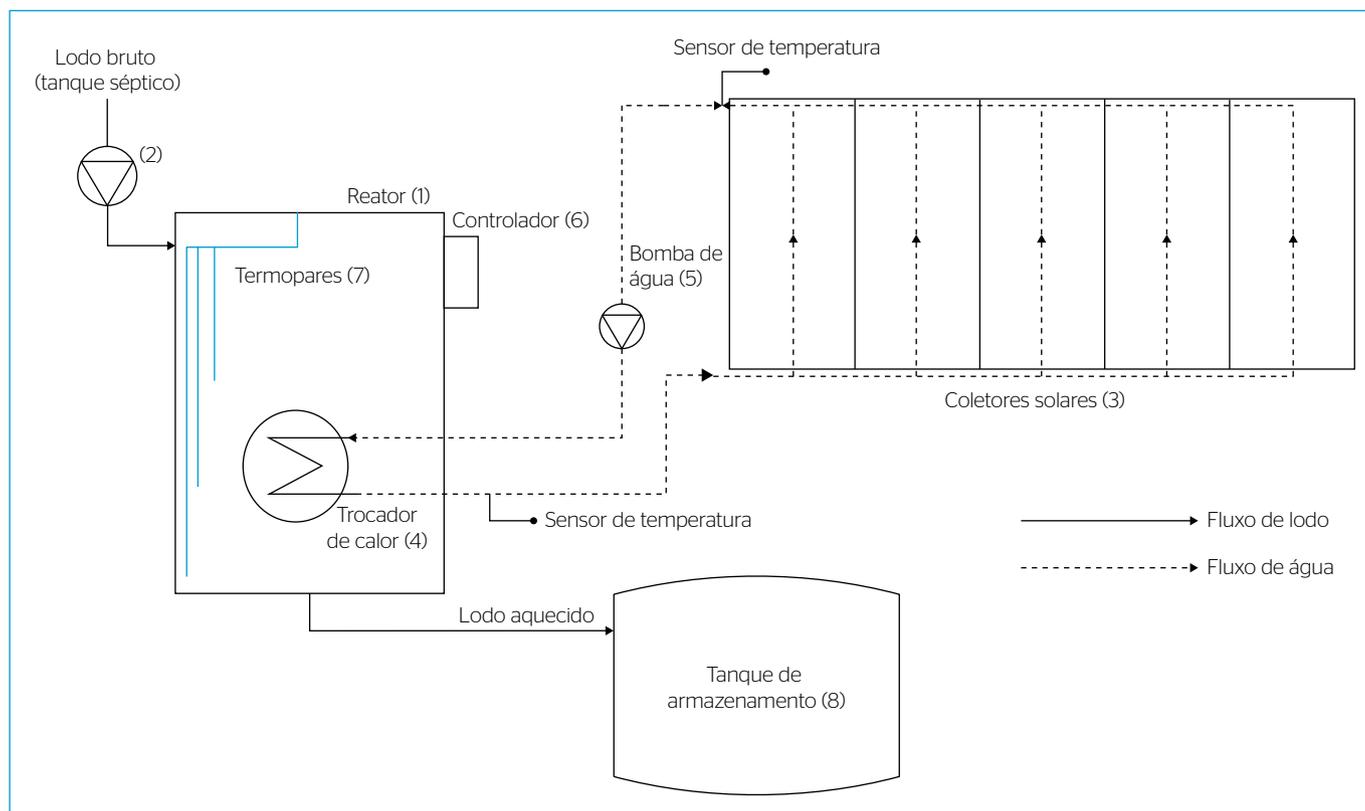


Figura 1 - Fluxograma do processo de higienização do lodo em batelada.

Tabela 2 - Dados de irradiação solar, insolação e temperatura média do ar para cada ensaio.

Ensaio	Condição meteorológica	Irradiação (W.h.m ²)			Insolação (h)	T _{ar} média (°C)
		Média do período	Máx.	Mín.		
03/12/2009	A: céu aberto; irradiação solar média >700 W.h.m ²	798	1055	227	10,1	30
07/12/2009		734	1060	186	8,7	29
20/12/2009		867	1086	506	11,9	29
20/02/2010		745	1005	322	10,7	30
30/01/2010	B: céu aberto; irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m ²	574	923	221	8,7	30
13/03/2010		537	894	191	7,6	31
17/04/2010		512	761	170	8,3	25
01/05/2010		529	745	207	10,1	26
09/05/2010	C: céu aberto; irradiação solar média <500 W.h.m ²	442	707	152	8,9	23
12/06/2010		253	498	93	4,8	21
03/07/2010		405	594	141	8,7	24
31/07/2010		415	631	89	7,4	25
16/01/2010	D: céu encoberto; irradiação solar média <500 W.h.m ²	374	649	171	3,5	25
23/01/2010		472	744	107	2,8	25
27/03/2010		356	593	113	1,6	27
11/04/2010		474	671	137	5,9	23

Em todos os ensaios foram utilizados 200 L de lodo tratado e tempo de tratamento de 8 horas (480 minutos), sempre com início às 9h e término às 17h. Durante o tratamento, amostras de lodo eram coletadas em frascos esterilizados para análises microbiológicas de *E. coli* e coliformes totais. Antes de cada coleta, a solução contida no reator era homogeneizada. As amostras eram resfriadas imediatamente em banho de gelo após a coleta e guardadas em bolsa térmica até o momento das análises.

A eficiência do tratamento térmico na inativação bacteriana foi medida com base nas concentrações inicial (N_o) e final (N_f) de *Escherichia coli* e de coliformes totais. O parâmetro utilizado foi o logaritmo negativo da fração de sobreviventes ($-\log(N_f/N_o)$), equivalente à redução da carga microbiana.

A temperatura do lodo em tratamento foi monitorada por meio de três termopares instalados dentro do reator em diferentes alturas: fundo, meio e superfície da coluna líquida. Utilizou-se a média dessas temperaturas na análise dos resultados. Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e medidos na Estação Automática de Florianópolis/São José, Santa Catarina.

Análise dos resultados

A fim de verificar diferenças na higienização do lodo sob as diferentes condições meteorológicas obtidas ao longo do ano, utilizou-se análise de variância não paramétrica, por meio do teste de Kruskal-Wallis ao nível de significância de 5%, com os dados de inativação agrupados em quatro faixas de irradiação solar: maior que 700 W.h.m⁻² (céu aberto), entre 500 e 700 W.h.m⁻² (céu aberto), abaixo de 500 W.h.m⁻² (céu aberto) e abaixo de 500 W.h.m⁻² (céu encoberto). A análise foi seguida pelo teste Student-Newman-Keuls. Considerou-se que há diferença significativa entre as médias quando $p < 0,05$. A ferramenta utilizada para esses testes foi o *software* Bioestat 5.3'.

A curva da temperatura do lodo em cada ensaio, obtida pela média das temperaturas medidas no fundo, meio e superfície do lodo, exibiu comportamento sigmoideal em todos os dias avaliados. Assim, foi possível o ajuste de um modelo aos dados de cada ensaio por meio de regressão não linear. O modelo utilizado segue descrito na Equação 1.

$$T_K(t) = \frac{A_o - A_f}{1 + \exp\left(\frac{t - x_o}{dx}\right)} + A_f \quad (1)$$

Onde,

$T_K(t)$ é a temperatura absoluta do lodo em função do tempo de tratamento ao longo de cada ensaio;

A_o representa a assíntota inferior da curva;

A_f representa a assíntota superior;

x_o é o ponto de inflexão;

dx é a inclinação da curva; e

t é o tempo ao longo de cada ensaio medido em minutos, sendo $t_{\text{inicial}} = 0$ e $t_{\text{final}} = 480$ minutos.

De acordo com Haug (1993) e Stumbo (1973), a cinética de inativação térmica de muitos microrganismos, principalmente bactérias, pode ser modelada assumindo decaimento de primeira ordem, conforme descrito na Equação 2.

$$\frac{dN}{dt} = -k_d N \quad (2)$$

Onde,

N é a concentração de células viáveis;

t é o tempo de tratamento; e

k_d é a taxa de inativação térmica.

A inativação térmica tem sido abordada frequentemente como uma reação química, sendo o modelo de Arrhenius, apresentado na Equação 3, usado para explicar o efeito da temperatura sobre a taxa de reação (Haug, 1993; Pflug; Holcomb; Gómez, 2001):

$$k_d = C \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{R \cdot T_K}\right) \quad (3)$$

Onde,

T_K é a temperatura em Kelvin;

C é a constante de inativação;

E_d é a energia de inativação; e

R é a constante dos gases ($R=8,3145 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$).

A inativação da *E. coli* em condições não isotérmicas no reator foi investigada com base em modelo cinético de primeira ordem (Equação 4), o qual foi resolvido numericamente e descreve o decaimento da concentração de células em função do tempo na forma diferencial, conforme propõe Haug (1993).

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot C \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{R \cdot T_K(t)}\right) \quad (4)$$

Onde,

N é a concentração de células viáveis;

t é o tempo de tratamento;

$T_K(t)$ é a temperatura absoluta do lodo em função do tempo de tratamento ao longo de cada ensaio;

C é a constante de inativação;

E_d é a energia de inativação; e

R é a constante dos gases ($R=8,3145 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$).

Os parâmetros C e E_d para *E. coli* foram determinados experimentalmente no lodo de esgoto em estudo por meio de ensaios de bancada, realizados pelo método do frasco de três bocas (Stumbo, 1973), sendo que a descrição desses ensaios pode ser encontrada em Fogolari, Reis e Philippi (2012). O valor utilizado de E_d foi $2,48 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$; da constante C foi de $1,03 \times 10^{39} \text{ min}^{-1}$. $T_K(t)$ é o modelo empírico da temperatura absoluta em função do tempo para cada ensaio, descrito pela Equação 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 observa-se que a irradiação solar média dos ensaios realizados em dezembro e fevereiro ficou acima de 700 W.h.m^{-2} (condição A), sendo essa a condição máxima obtida. Nos demais ensaios realizados com o céu aberto até 1º de maio, a irradiação média esteve entre 500 e 700 W.h.m^{-2} , representando uma condição intermediária no tratamento (condição B). Nos ensaios restantes, aqueles realizados após 9 de maio em condições de céu aberto (condição C) e aqueles realizados com o céu encoberto (condição D), a irradiação solar média foi inferior a 500 W.h.m^{-2} , consistindo nas piores condições para o tratamento térmico.

A temperatura média do lodo apresentou comportamento sigmoidal ao longo das oito horas de tratamento em todos os ensaios. Com base na Equação 1, foram ajustadas curvas aos dados de temperatura em

função do tempo através de regressão não linear. Os parâmetros do modelo obtidos em cada ensaio, os respectivos erros e coeficientes de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 3.

Conforme observado nos valores do erro padrão de cada parâmetro, o ajuste do modelo aos dados de temperatura foi satisfatório. Os resíduos das temperaturas ($T_{\text{observado}} - T_K(t)$) foram baixos, ficando entre os extremos $-2,6$ e $2,9 \text{ K}$, aceitável para o processo em estudo. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) foi elevado em todos os ensaios ($R^2 > 0,99$).

A Tabela 4 apresenta a temperatura média do lodo monitorada ao longo de cada ensaio. Os dados de temperatura foram medidos em intervalos de aproximadamente 10 minutos, contudo, nessa tabela são apresentados apenas dados de hora em hora para fins de visualização, visto que os demais podem ser estimados pela Equação 1 e os parâmetros da Tabela 3.

A Figura 2 apresenta a inativação de *E. coli* e coliformes totais, medida por meio do logaritmo negativo da fração de sobreviventes ($-\log(N_f/N_o)$), e a respectiva irradiação solar média em cada ensaio. Pelo teste de Kruskal-Wallis, a inativação de *E. coli* e coliformes totais diferiu significativamente entre as diferentes condições meteorológicas avaliadas ($p < 0,01$).

Observa-se na Figura 2 a elevada eficiência obtida nos ensaios com irradiação solar média acima de 500 W.h.m^{-2} , realizados entre dezembro e maio em condições de céu aberto. A redução de *E. coli* e coliformes

Tabela 3 - Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado aos dados de temperatura absoluta do lodo, erro padrão e coeficiente de determinação para cada ensaio.

Ensaio	Parâmetros								
	A_o	Erro	A_i	Erro	x_o	Erro	dx	Erro	R^2
03/12/2009	297,54	0,72	335,67	0,24	163,82	3,12	72,71	2,52	0,998
07/12/2009	299,21	0,95	336,32	0,40	184,39	4,32	72,56	3,96	0,995
20/12/2009	295,17	1,01	344,72	0,44	177,02	3,56	77,72	3,35	0,997
20/02/2010	300,62	0,57	344,36	0,45	217,75	2,46	59,81	2,63	0,997
30/01/2010	296,20	0,62	328,62	0,38	203,85	3,44	63,93	3,58	0,994
13/03/2010	297,63	0,65	333,22	0,41	202,06	3,46	58,20	3,38	0,995
17/04/2010	297,95	0,65	332,04	0,41	205,59	3,48	64,11	3,57	0,994
01/05/2010	298,36	0,87	336,38	0,29	150,41	3,43	54,13	2,86	0,994
09/05/2010	294,02	0,65	324,00	0,33	187,46	3,76	63,80	3,65	0,994
12/06/2010	289,44	0,24	313,26	0,17	214,53	1,91	55,99	1,88	0,998
03/07/2010	291,98	0,65	329,88	0,36	194,49	3,09	66,61	3,06	0,996
31/07/2010	289,68	0,60	326,82	0,30	184,67	2,76	60,58	2,62	0,996
16/01/2010	295,23	0,67	313,17	0,31	173,18	6,23	74,71	6,10	0,992
23/01/2010	295,04	0,66	317,17	0,45	210,62	5,64	82,75	6,55	0,995
27/03/2010	299,14	0,37	317,03	0,26	209,15	3,86	88,28	4,76	0,998
11/04/2010	294,07	0,54	313,45	0,29	191,34	5,02	67,59	4,96	0,994

A_o : assíntota inferior da curva; A_i : assíntota superior; x_o : ponto de inflexão; dx: inclinação da curva; R^2 : coeficiente de determinação.

totais nesses ensaios foi superior a 4 log₁₀. Pelo teste Student-Newman-Keuls, a inativação nos ensaios realizados com irradiação solar média acima de 700 W.h.m⁻² não diferiu, ao nível de significância de 5%, daqueles realizados com irradiação entre 500 e 700 W.h.m⁻², tanto para *E. coli* quanto coliformes totais. A Tabela 5 apresenta todas as comparações múltiplas, pelo teste Student-Newman-Keuls, da inativação de *E. coli* e coliformes totais nas diferentes condições meteorológicas.

A eficiência de inativação bacteriana nos ensaios com irradiação solar média inferior a 500 W.h.m⁻² diminuiu consideravelmente: entre 0,2 e 2,7 log₁₀ para *E. coli* e entre 0,5 e 3,5 log₁₀ para coliformes totais. As inativações nos ensaios realizados com irradiação solar média inferior a 500 W.h.m⁻² não diferiram entre si pelo teste Student-Newman-Keuls (comparação entre condições C e D), mas foram significativamente inferiores àquelas nos ensaios com irradiação solar média acima de 700 W.h.m⁻² (comparação das condições A com C e D).

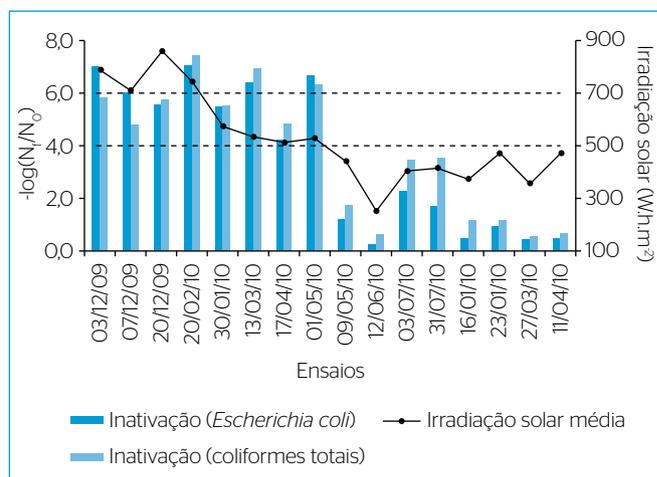


Figura 2 - Inativação da *Escherichia coli* e coliformes totais no reator e a respectiva irradiação solar média para cada ensaio. N_i: concentração inicial; N_f: concentração final, ambas em número mais provável por 100 mL⁻¹.

Tabela 4 - Temperatura média (°C) do lodo de esgoto no reator térmico ao longo de cada ensaio.

Ensaio	Tempo de tratamento (minutos)								
	0	60	120	180	240	300	360	420	480
03/12/2009	28,7	31,2	37,9	46,7	53,4	58,4	60,4	60,9	61,6
07/12/2009	27,5	31,1	38,1	43,9	50,5	56,4	60,7	61,8	61,0
20/12/2009	26,5	30,4	37,5	47,3	57,6	63,4	66,9	69,5	68,3
20/02/2010	28,0	30,9	35,2	42,8	53,1	62,2	67,9	69,4	69,2
30/01/2010	23,9	26,5	30,9	37,6	44,2	51,0	53,8	53,6	53,7
13/03/2010	24,5	27,2	31,5	39,1	45,3	55,0	58,9	59,4	59,3
17/04/2010	25,7	29,1	33,7	39,0	45,4	53,5	57,0	57,6	57,5
01/05/2010	25,3	31,8	39,7	47,8	57,5	61,6	62,6	61,6	61,3
09/05/2010	21,7	24,1	29,0	34,6	40,2	47,0	49,6	50,6	49,8
12/06/2010	17,0	17,7	20,8	24,0	30,7	35,7	37,6	39,8	39,8
03/07/2010	21,5	23,0	29,2	36,2	44,2	50,5	53,9	55,1	54,8
31/07/2010	18,3	21,1	26,5	33,8	42,2	50,7	51,7	52,5	52,3
16/01/2010	24,2	25,4	27,3	31,7	34,3	37,8	38,4	38,6	39,0
23/01/2010	23,4	25,7	27,9	31,3	35,2	38,6	41,7	43,7	43,2
27/03/2010	27,6	29,1	30,9	33,5	36,4	38,8	41,5	42,7	42,8
11/04/2010	22,5	24,1	26,2	29,2	34,6	37,6	38,6	39,7	39,5

Tabela 5 - Comparações da inativação de *Escherichia coli* e coliformes totais entre as diferentes condições meteorológicas.

<i>Escherichia coli</i>			Coliformes totais		
Condições	Média±DP	Valor p	Condições	Média±DP	Valor p
A versus B	6,42±0,76 versus 5,67±1,11	ns	A versus B	5,93±1,08 versus 5,88±0,92	ns
A versus C	6,42±0,76 versus 1,31±0,88	p<0,05	A versus C	5,93±1,08 versus 2,30±1,40	p<0,05
A versus D	6,42±0,76 versus 0,55±0,24	p<0,01	A versus D	5,93±1,08 versus 0,83±0,31	p<0,01
B versus C	5,67±1,11 versus 1,31±0,88	ns	B versus C	5,88±0,92 versus 2,30±1,40	ns
B versus D	5,67±1,11 versus 0,55±0,24	p<0,05	B versus D	5,88±0,92 versus 0,83±0,31	p<0,01
C versus D	1,31±0,88 versus 0,55±0,24	ns	C versus D	2,30±1,40 versus 0,83±0,31	ns

Média±DP: média e desvio padrão da inativação (-log(N_f/N_i)) para as respectivas condições comparadas; ns: diferença não significativa pelo teste de Student-Newman-Keuls; A: céu aberto, irradiação solar média >700 W.h.m⁻²; B: céu aberto, irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m⁻²; C: céu aberto, irradiação solar média <500 W.h.m⁻²; D: céu encoberto, irradiação solar média <500 W.h.m⁻².

Os ensaios com irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m⁻² não diferiram dos ensaios realizados em céu aberto e irradiação média inferior a 500 W.h.m⁻², mas diferiram significativamente dos ensaios realizados com o céu encoberto. A presença excessiva de nuvens no céu, mesmo em dias quentes, comprometeu a elevação da temperatura do lodo, fazendo com que a inativação fosse significativamente inferior se comparada com um dia ensolarado na mesma época do ano (comparação entre as condições B e D). Outro fator a ser considerado na operação do processo é que a irradiação solar sofre quedas acentuadas no inverno e em parte do outono na região em questão, sendo que a energia solar disponível não foi suficiente para elevar a temperatura do lodo em níveis suficientes para higienização, mesmo com o céu aberto.

O modelo de inativação de primeira ordem, proposto na Equação 4, foi resolvido numericamente para cada ensaio no reator fazendo uso dos parâmetros cinéticos, E_d e C , encontrados para a *Escherichia coli* no trabalho de Fogolari, Reis e Philippi (2012), e dos parâmetros da curva de temperatura ajustada em função do tempo, descritos na Tabela 3.

A Figura 3 apresenta os resultados da aplicação do modelo cinético em dois ensaios no reator, sendo um com irradiação solar média acima de 700 W.h.m⁻² (Figura 3A) e outro com irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m⁻² (Figura 3B), ambos realizados com o céu aberto. Os demais ensaios realizados nessas condições apresentaram curvas semelhantes.

A elevada temperatura do lodo nos ensaios com irradiação solar média acima de 700 W.h.m⁻² (superior a 60°C por aproximadamente 3 horas) propiciou rápido decaimento de *E. coli*, sendo que em

aproximadamente 300 minutos não foram mais detectadas células viáveis, tanto pelo modelo cinético quanto pelas observações experimentais. Outros trabalhos também relataram eficiências satisfatórias no tratamento de lodo com temperaturas em torno de 60°C. Lang e Smith (2008) obtiveram decaimento de *E. coli* O158 com $T_{90}=2,6$ minutos em lodo de esgoto aquecido a 55°C, sendo que em 70°C a inativação foi praticamente instantânea. Aitken *et al.* (2005), avaliando tratamento térmico de biossólido produzido com lodo de um digestor contínuo, relata que não foram mais detectados ovos viáveis de *Ascaris suum* após tratamento em 53°C por 30 minutos. Pecson *et al.* (2007), também em estudos com lodo de esgoto, obtiveram a inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides* após 110 minutos em 50°C. Apesar de, no presente estudo, terem sido avaliados somente indicadores bacterianos, ressalta-se que a condição de 60°C por 3 horas, possibilitada por meio do aquecimento com a energia solar, possivelmente promoveria também a inativação de outros patógenos, inclusive de ovos de helmintos, sendo que essa consideração é feita com base nos resultados dos autores supracitados.

Para os ensaios com irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m⁻², as curvas de temperatura sofreram leve queda, no entanto, ficaram acima de 53°C por mais de 3 horas. As curvas de inativação também sofreram pequeno atraso se comparadas com as anteriores. Contudo, em 360 minutos de tratamento já não foram mais detectadas células viáveis em nenhum desses testes.

O modelo de predição da inativação também foi verificado nos ensaios com baixa eficiência, aqueles com irradiação solar média inferior a 500 W.h.m⁻². A Figura 4 exemplifica a aplicação do modelo em dois desses ensaios:

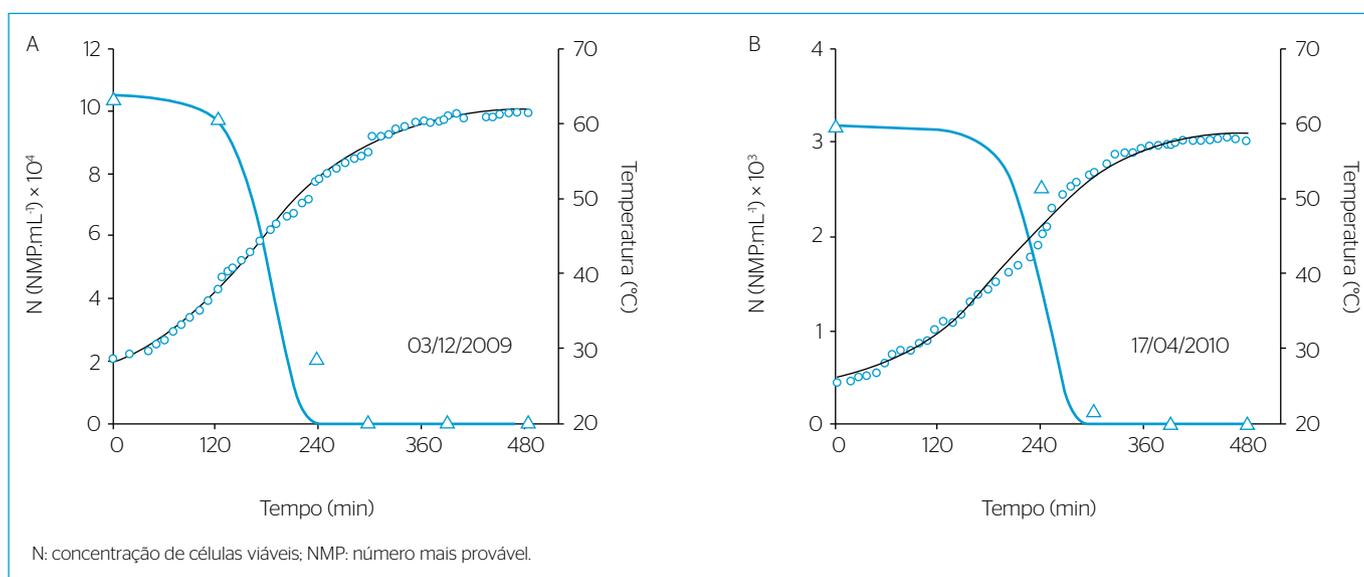


Figura 3 - Inativação térmica da *Escherichia coli* no reator com aquecimento solar (ΔN observado; — N predito) e temperatura média do lodo ($\circ T_{\text{observado}}$; — $T_K(t)$): (A) ensaio com irradiação solar média >700 W.h.m⁻²; (B) ensaio com irradiação solar média entre 500 e 700 W.h.m⁻², ambos com céu aberto.

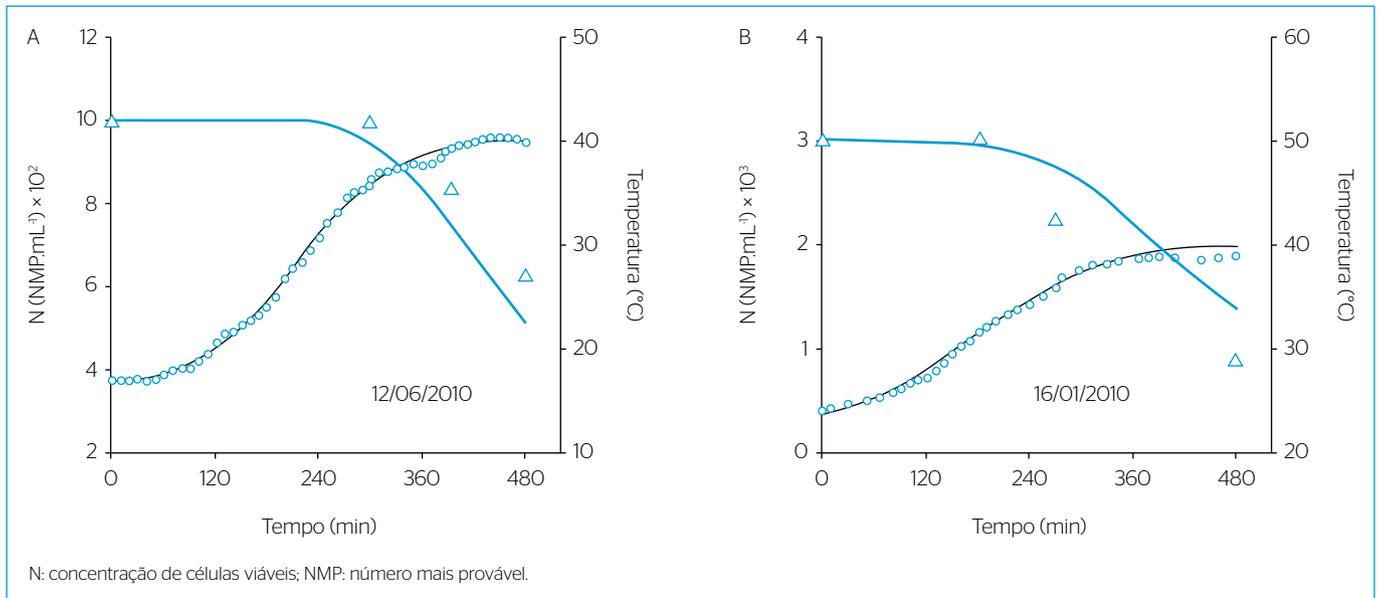


Figura 4 - Inativação térmica da *Escherichia coli* no reator com aquecimento solar (Δ N observado; — N previsto) e temperatura média do lodo (\circ T observado; — $T_k(t)$): (A) ensaio com irradiação solar média $<500 \text{ W.h.m}^{-2}$ com céu aberto; (B) ensaio com irradiação solar média $<500 \text{ W.h.m}^{-2}$ com céu encoberto.

- dia 12/06 (Figura 4A), um dia típico de outono/inverno no sul do Brasil, quando, apesar do céu ensolarado, a irradiação média do período foi de apenas 253 W.h.m^{-2} ;
- dia 16/01 (Figura 4B), dia quente de verão, com o céu totalmente encoberto por nuvens.

Os quatro ensaios realizados em condições de céu encoberto apresentaram temperaturas inferiores a 45°C em todos os testes, o que ocasionou baixa eficiência do processo de higienização. A redução *E. coli* nesses ensaios não foi expressiva e, ao final das 8 horas de tratamento, a redução foi inferior a $1 \log_{10}$.

Deve-se considerar que Florianópolis, Santa Catarina, está em uma das regiões do Brasil com as menores médias anuais de irradiação solar global (Colle; Pereira, 1998). Regiões como o nordeste e o centro-oeste do país possuem os maiores índices e menores variabilidades mensais, portanto, apresentam potencial ainda maior de utilização desse processo de higienização de lodo de esgoto com energia solar.

O tratamento térmico pode ser um processo eficiente na inativação microbiana, no entanto, necessita de rigoroso controle. O aquecimento e a homogeneidade do meio devem ser suficientes para garantir a transferência de calor necessária à elevação da temperatura, atingindo valores previamente determinados que promovam a higienização do lodo de modo uniforme. Outro fator a ser controlado é a possível recontaminação do lodo devido ao manejo inadequado após o tratamento ou o possível recrescimento microbiano que pode ocorrer caso a inativação térmica não tenha sido eficaz.

Destaca-se também que a utilização da *E. coli* como indicador de processos de higienização/desinfecção é muito comum, no entanto,

deve-se levar em consideração que outros grupos de microrganismos patogênicos, como helmintos (por meio de seus cistos, oocistos e ovos) (Aitken *et al.*, 2005; Pecson *et al.*, 2007) e enterovírus (MOCÉ-LLIVINA *et al.*, 2003), podem apresentar maior resistência térmica, sendo parâmetros essenciais na avaliação de processos de higienização.

CONCLUSÕES

O reator com aquecimento solar apresentou grande potencial de redução da carga bacteriana para o lodo de esgoto em estudo. Os melhores desempenhos do reator foram observados nos ensaios realizados com irradiação solar média superior a 500 W.h.m^{-2} . Nesses casos foram alcançadas remoções de *E. coli* e de coliformes totais, respectivamente, entre $4,2$ e $7,1 \log_{10}$ e entre $4,8$ e $7,4 \log_{10}$. Em contrapartida, nos ensaios realizados com irradiação solar mais baixa, a remoção de *E. coli* ficou entre $0,2$ e $2,3 \log_{10}$ e a de coliformes totais entre $0,5$ e $3,5 \log_{10}$ devido à baixa temperatura atingida no lodo.

O modelo diferencial de primeira ordem se mostrou satisfatório na predição da concentração de *E. coli* em condições não isotérmicas no reator, podendo ser útil na avaliação da eficiência de processos de higienização térmica de lodo de esgoto. Para efetivação da segurança de um processo de inativação térmica, as cinéticas de inativação de outros microrganismos indicadores e patogênicos devem ser avaliadas. Cabe destacar que a Resolução Conama nº 375/2006 estabelece concentrações limites para ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus entéricos, além de coliformes termotolerantes.

REFERÊNCIAS

- AITKEN, M.D.; SOBSEY, M.D.; BLAUTH, K.E.; SHEHEE, M.; CRUNK, P.L.; WALTERS, G.W. (2005) Inactivation of *Ascaris suum* and Poliovirus in biosolids under thermophilic anaerobic digestion conditions. *Environmental Science and Technology*, v. 39, p. 5804-5809.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Washington, DC.: APHA; AWWA; WEF. 1195 p.
- ARTHURSON, V. (2008) Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 74, n. 17, p. 5267-5275.
- BEZERRA, A. M. (1986) *Aplicações térmicas da energia solar*. 2. ed. João Pessoa: Ed. Universitária UFPB. 221 p.
- BOUDAUD, N.; MACHINAL, C.; DAVID, F.; FRÉVAL-LE BOURDONNEC, A.; JOSSENT, J.; BAKANGA, F.; ARNAL, C.; JAFFREZIC, M.P.; OBERTI, S.; GANTZER, C. (2012) Removal of MS2, Q β and GA bacteriophages during drinking water treatment at pilot scale. *Water Research*, v. 46, p. 2651-2664.
- BRASIL. (2006) Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 375*. Brasília. 32 p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2013.
- COLLE, S.; PEREIRA, E.B. (Orgs.). (1998) *Atlas de Radiação Solar do Brasil*: 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR/EMC/UFSC). 65 p.
- FIDJELAND, J.; MAGRI, M.E.; JÖNSSON, H.; ALBIHN, A.; VINNERÅS, B. (2013) The potential for self-sanitisation of faecal sludge by intrinsic ammonia. *Water Research*, v. 47, p. 6014-6023.
- FOGOLARI, O. (2011) *Desinfecção de lodo de tanque séptico em reator com aquecimento solar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 151 p.
- FOGOLARI, O.; REIS, C.Z.; PHILIPPI, L.S. (2012) Determinação de parâmetros cinéticos de inativação térmica de *Escherichia coli* em lodo de esgoto. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 3, p. 255-262.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. (2008) Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p. 116-140.
- HAUG, R.T. (1993) *The practical handbook of compost engineering*. Boca Raton: Lewis. 717p.
- LANG, N.L.; SMITH, S.R. (2008) Time and temperature inactivation kinetics of enteric bacteria relevant to sewage sludge treatment processes for agricultural use. *Water Research*, v. 42, n. 8-9, p. 2229-2241.
- MOCÉ-LLIVINA, L.; MUNIESA, M.; PIMENTA-VALE, H.; LUCENA, F.; JOFRE, J. (2003) Survival of bacterial indicator species and bacteriophages after thermal treatment of sludge and sewage. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 69, n. 3, p. 1452-1456.
- PECSON, B.M.; BARRIOS, J.A.; JIMÉNEZ, B.E.; NELSON, K.L. (2007) The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of *Ascaris* eggs in sewage sludge. *Water Research*, v. 41, n. 13, p. 2893-2902.
- PFLUG, I.J.; HOLCOMB, R.G.; GÓMEZ, M.M. (2001) Principles of the thermal destruction of microorganisms. In: BLOCK, S.S. *Disinfection, sterilization and preservation*. 5. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 1481 p.
- SILVA, M.O.S.A. (1977) *Análises físico-químicas para construção de estações de tratamento de esgotos*. São Paulo: CETESB. 225 p.
- SPINKS, A.T.; DUNSTAN, R.H.; HARRISON, T.; COOMBES, P.; KUCZERA, G. (2006) Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. *Water Research*, v. 40, p.1326-1332.
- STUMBO, C.R. (1973) *Thermobacteriology in food processing*. 2. ed. New York: Academic Press. 329 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2003) *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*. EPA/625/R-92/013. Washington, DC.: U. S. Environmental Protection Agency. 178 p.
- VENGLOVSKY, J.; MARTINEZ, J.; PLACHA, I. (2006) Hygienic and ecological risks connected with utilization of animal manures and biosolids in agriculture. *Livestock Science*, v. 102, p. 197-203.
- VINNERÅS, B. (2007) Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 17, p. 3317-3321.
- VOGEL, A.I. (1981) *Análise inorgânica qualitativa*. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara. 690 p.
- YUK, H.; GEVEKE, D.J.; ZHANG, H.Q.; JIN, T.Z. (2009) Comparison of aluminum thermal-death-time disks with a pilot-scale pasteurizer on the thermal inactivation of *Escherichia coli* K12 in apple cider. *Food Control*, v. 20, p.1053-1057.