

Efeito da oxigenação por agitação manual da água na eficiência de inativação de coliformes termotolerantes utilizando luz solar para desinfecção em batelada

Effect of oxygenation by manual agitation of water on inactivation efficiency of thermotolerant coliforms using solar light batch disinfection

Márcio Pessoa Botto

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Saneamento Ambiental. Doutorando em Saneamento Ambiental pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da UFC

Francisco Suetônio Bastos Mota

Doutor em Saúde Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Professor Titular do DEHA/UFC. Membro da Academia Cearense de Ciências

Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

Doutora em Ciências Biológicas (Microbiologia) pela USP. Professora Titular do Departamento de Biologia do CCBS Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Resumo

Foi avaliado o efeito da agitação manual de amostras de água submetidas à desinfecção solar na eficiência de inativação de coliformes termotolerantes. Garrafas com agitação prévia e sem agitação foram expostas à radiação solar no horário das 9h às 15h (seis horas no total) e analisados o teor de oxigênio dissolvido (OD) e concentração de coliformes termotolerantes de hora em hora. A desinfecção com luz solar mostrou-se capaz de melhorar a qualidade sanitária da água, reduzindo a concentração de coliformes termotolerantes em até quatro unidades logarítmicas (de $1,03 \times 10^6$ até $2,6 \times 10^1$ NMP/100 mL). Com a agitação manual, houve oxigenação considerável nas amostras de água (máxima concentração de OD de 6,61 mg/L nas amostras de águas agitadas e de 5,56 mg/L nas amostras sem agitação), porém o aumento de OD na água não teve efeito significativo sobre a inativação dos coliformes termotolerantes ($p > 0,05$).

Palavras-chave: decaimento bacteriano; garrafas PET; radiação solar; oxigênio dissolvido.

Abstract

This study aimed at evaluating the manual agitation effect on inactivation efficiency of thermotolerant coliforms of water bottles submitted to solar disinfection. Agitated bottles and non-agitated bottles were exposed to sunlight from 9:00 a.m. to 3:00 p.m. Dissolved oxygen (DO) and thermotolerant coliforms concentrations were analyzed hourly. The solar disinfection improved the water quality, reducing thermotolerant coliforms concentration by 4 logs (from 1.0×10^6 to 2.6×10^1 NMP/100 mL). With the manual agitation, there was considerable oxygenation in the water samples (maximum of 6.61 mg/L in samples with manual agitation and of 5.56 mg/L for those without agitation), but the increase in DO had no significant effect on the inactivation of thermotolerant coliforms ($p > 0.05$).

Keywords: bacterial decay; PET bottles; solar radiation; dissolved oxygen.

Introdução

Apesar dos esforços realizados nas décadas de 1980 e 1990 para prover condições adequadas de saneamento, hoje cerca de 1,1 bilhão de pessoas ainda não possuem acesso a abastecimento de água de boa qualidade (WHO/UNICEF, 2000).

O fornecimento de água potável para populações rurais é um desafio econômico e tecnológico. Na sede dos municípios onde não há abastecimento de água por rede geral, as prefeituras

disponibilizam água tratada em chafarizes de uso coletivo, nos quais as pessoas de áreas próximas se abastecem utilizando baldes, latas e tonéis que transportam a pé, em burros ou em carroças, com risco de contaminação da água durante a coleta, o transporte e o armazenamento posterior nas residências. Todavia, numerosas famílias rurais não têm acesso a essa água tratada e continuam usando para beber, cozinhar e realizar higiene pessoal as águas brutas de barreiros, cacimbas, poços e, quando disponível, água de chuva.

Endereço para correspondência: Márcio Pessoa Botto – Campus do PICI, Bloco 713 – 60455-900 – Fortaleza (CE), Brasil – Tel.: (85) 33669624 e fax: (85) 33669627 – E-mail: marciobotto@yahoo.com

Recebido: 19/6/08 – Aprovado: 6/6/09 – Reg. ABES: 104/08

Para essas populações, é importante dispor de tecnologias inovadoras apropriadas, simples e de baixo custo, que possam ser geridas e sustentadas a partir de recursos locais para que sejam bem aceitas pela população e que se tornem barreiras sanitárias incorporadas nos hábitos diários (WEGELIN *et al*, 1994).

A desinfecção é uma poderosa barreira sanitária que pode garantir água de excelente qualidade microbiológica para consumo humano. A desinfecção de água com luz solar vem sendo aplicada em países em desenvolvimento como uma técnica segura para o tratamento da água. O método SODIS, sigla para *solar disinfection*, é um método em batelada, simples e barato, que dispensa o fornecimento de energia elétrica e utiliza apenas garrafas tipo PET (Polietileno tereftalato) e o sol, universalmente disponível e gratuito.

Vários estudos (ACRA; RAFFOUL; KARAHAGOPIAN, 1984; WEGELIN *et al*, 1994; SOMMER *et al*, 1997; REED, 1997) apontam a eficiência do método, com inativação de 99,9% de coliformes termotolerantes durante tempo médio de cinco horas de exposição ao sol. Essa eficiência, segundo os autores, depende das condições de insolação local, grau de nebulosidade, qualidade da água (turbidez e cor), tipo de recipiente a ser utilizado, espessura da lâmina d'água, condição de aerobiose e superfície suporte para exposição ao sol. A maior desvantagem dessa técnica é a ausência de residual desinfetante na água, o que pode permitir a recontaminação da água, dependendo das condições de armazenamento e higiene domiciliar.

O requisito básico para a desinfecção com luz solar é o grau de radiação solar incidente. Segundo Zapp *et al* (1987 *apud* DANIEL *et al*, 2001), é necessário um mínimo de duas horas de exposição a 600W.m⁻² de radiação solar global direta, para que ocorra efetivo decaimento microbiano.

A ação microbicida da luz solar sobre os micro-organismos se deve principalmente aos efeitos da radiação UV-A, que chega à superfície terrestre e à radiação infravermelha. A primeira atinge os

ácidos nucleicos e promove reações fotoquímicas de efeito microbicida, inativando vírus, bactérias, cistos de protozoários e ovos de helmintos, ao causar alterações na molécula de DNA (formação de dímeros de citosina, guanina e principalmente timina, que interrompem a duplicação da dupla hélice do DNA) (DANIEL *et al*, 2001). A segunda eleva a temperatura da água. O efeito sinérgico de ambas pode gerar condições ótimas para a desinfecção (BRANDÃO *et al*, 2000).

Diversos autores citam que o efeito bactericida da radiação solar na água depende do nível de oxigênio dissolvido (CURTIS *et al*, 1992; GOURMELON *et al*, 1994; REED, 1997 *apud* KEHOE, 2001). O oxigênio molecular reage com a luz solar gerando radicais livres hiperativos como superóxidos, hidroxilas e outros compostos oxidantes e tóxicos, como peróxidos que destroem estruturas básicas das células, em especial as membranas celulares e inibem atividades enzimáticas, causando a morte de micro-organismos procarionóticos e eucarióticos.

Segundo Meyer e Reed (2001), algumas espécies de bactérias presentes nas fezes possuem resistência à inativação pela radiação solar na ausência de oxigênio. Em consequência, para a aplicação da desinfecção solar em batelada usando garrafas PET, é recomendada a aeração da água por agitação manual das garrafas. Kehoe *et al* (2001) sugerem encher a garrafa até $\frac{2}{3}$ de sua capacidade, agitá-la durante um minuto para garantir altas concentrações iniciais de oxigênio dissolvido, completar o restante da garrafa e, então, expô-la à radiação solar.

O presente trabalho apresenta resultados sobre a eficiência da desinfecção solar de água avaliando-se o efeito da incorporação de oxigênio dissolvido por agitação manual de garrafas PET.

Metodologia

A pesquisa foi realizada no Estado do Ceará, nordeste do Brasil, região tropical de coordenadas 2°46'30" e 7°52'15" de latitude sul e 37°14'54" e 41°24'45" de longitude ocidental.

O experimento foi montado na Estação Climatológica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC). Foram construídas superfícies de concreto (1,50 m de comprimento por 1,50 m de largura) com inclinação de 4°, referente à latitude do local, e apontadas para o norte, onde as garrafas com a água a ser desinfetada ficaram expostas ao sol (Figura 1).

Preparo da água contaminada

Água proveniente de um poço com profundidade de 49 m, nível estático de 23 m, nível dinâmico de 43 m e vazão de 4.200L.h⁻¹ foi contaminada com esgoto doméstico coletado por meio de baldes e cordas em um poço de visita no campus da UFC, com o intuito de



Figura 1 – Bancada de exposição das garrafas

preparar amostras com concentrações iniciais de coliformes termotolerantes superiores a 10^5 NMP por 100 mL. Para alcançar tais concentrações, foram preparadas diluições de água na proporção de 0,5 L de esgoto bruto para 20 L de água. Essas amostras foram preparadas momentos antes de cada teste.

Preparo, agitação e exposição das garrafas

Para cada ensaio foram utilizadas 14 garrafas tipo PET (terifitalato de polietileno) transparentes de 2 L, das quais seis foram agitadas manualmente durante um período de 30 segundos cada, seis não foram agitadas e duas foram usadas para controle no escuro.

O procedimento de enchimento das garrafas com a água sob teste foi o seguinte: as seis garrafas a serem arejadas foram preenchidas com a água contaminada até $\frac{2}{3}$ da sua capacidade e agitadas manualmente durante um minuto. Logo depois, completou-se o volume da garrafa até o gargalo com a mesma água; as garrafas sem agitação foram preenchidas de uma vez até o gargalo com a água sob estudo; as duas garrafas controle, sem agitação, foram cobertas completamente com papel alumínio para evitar a penetração da luz solar. As 12 primeiras garrafas foram expostas à radiação solar sobre a superfície de concreto pintado de branco (Figura 1). As duas garrafas controle foram mantidas em ambiente seco e arejado, sala escura do departamento de engenharia agrícola, sem exposição direta à radiação solar, com temperatura ambiente entre 28 e 33°C.

Foram realizadas três baterias de ensaio totalizando 42 amostras: 36 de garrafas expostas ao sol (18 com agitação e 18 sem agitação) e 6 amostras controle.

Cada teste foi realizado no período entre 9h e 15h, por ser esse o horário de maior insolação. A cada hora (uma, duas, três, quatro, cinco, seis horas), duas garrafas, uma com agitação prévia e outra não agitada, eram retiradas do sol. Para as análises físico-químicas e bacteriológicas foram utilizados aproximadamente 350 mL do volume total de cada garrafa (2 L). As análises bacteriológicas foram feitas em duplicata, com o propósito de detectar e/ou evitar possíveis erros analíticos laboratoriais.

Parâmetros analisados

Em cada amostra de cada bateria de ensaio, foram analisados os seguintes parâmetros: turbidez (Espectrofotômetro marca HACH,

modelo DR/2000), cor (Espectrofotômetro marca HACH, modelo DR/2000), pH (Potenciômetro marca MICRONAL, modelo B474), oxigênio dissolvido (sonda YSI-55), temperatura da água (sonda YSI-55), concentração de coliformes termotolerantes (técnica de tubos múltiplos, Meio A1 – APHA, 1998).

Dados meteorológicos (radiação solar e temperatura do ar) foram coletados a cada trinta minutos pela estação climatológica e armazenados no datalogger (Campbell Scientific, Inc, modelo: CR 10X).

Cálculo do decaimento bacteriano

A taxa de mortalidade bacteriana foi estimada de acordo com a lei de Chick (Equação 1) (VON SPERLING, 1996).

$$N = N_0 \cdot e^{-k_b t} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

N: concentração de coliformes termotolerantes no tempo t (NMP.100 mL⁻¹);

N₀: concentração inicial de coliformes termotolerantes (NMP.100 mL⁻¹);

k_b = constante de inativação (d⁻¹);

t = tempo (h).

Para a determinação da constante de decaimento bacteriano k_b , foi utilizado o método dos mínimos quadrados, de Reed-Therault (VON SPERLING, 1996).

Análises estatísticas

As ferramentas computacionais usadas foram: “STATDISK 9.1” 9th e *Statistical package for the social sciences* (SPSS) versão 10. Foi aplicado o teste de hipótese de comparação das médias entre duas amostras independentes (razão t de Student).

Resultados

A Tabela 1 apresenta a qualidade inicial das águas de poço inoculadas com esgoto e usadas nos três ensaios, antes da exposição ao sol.

Em todas as amostras, a turbidez inicial foi inferior a 30 uT, limite máximo recomendado para a técnica de desinfecção solar (WEGELIN *et al*, 1994; SOMMER *et al*, 1997).

Tabela 1 – Parâmetros físicos e microbiológicos das águas inoculadas com esgoto antes da exposição ao sol para os três dias de ensaio (Fortaleza, 2005)

Data de ensaio	Turbidez (uT)	Cor (uH)	pH	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
22/nov/05	6,5	39,5	7,54	2,05E+06
6/dez/05	6,0	30,5	7,40	1,95E+06
8/dez/05	1,0	11,0	7,62	2,07E+06

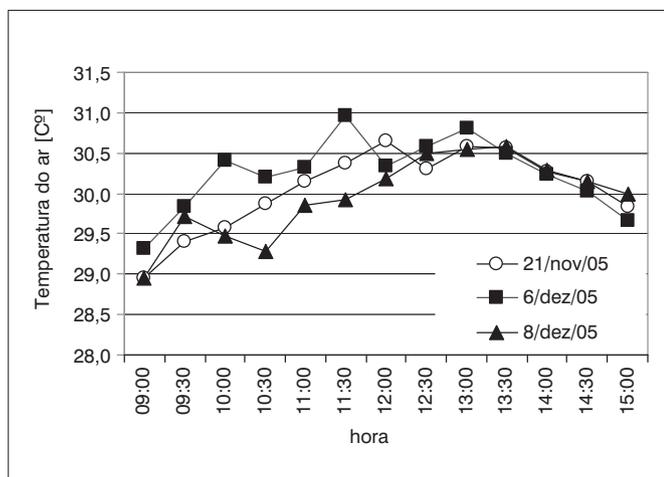


Figura 2 – Variação da temperatura do ar (°C) durante o tempo de exposição ao sol das amostras de água em garrafas PET (Fortaleza, 2005)

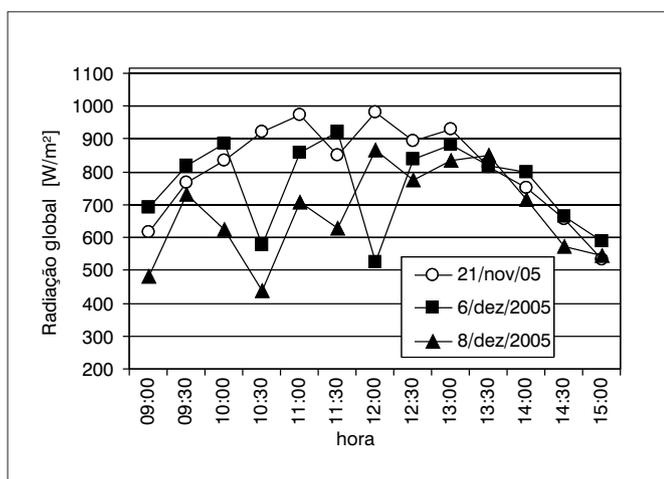


Figura 3 – Variação da intensidade de radiação solar ($W.m^{-2}$) durante o tempo de exposição das amostras de água em garrafas PET (Fortaleza, 2005)

Concomitante à coleta das amostras, foram registrados parâmetros meteorológicos referentes aos três dias de ensaio (Tabela 2, Figuras 2 e 3). A Tabela 2 mostra que em todos os dias de ensaio houve mais de dez horas de brilho no período diurno.

A Figura 2 mostra que houve pequena variação horária da temperatura do ar durante os dias de ensaio, com valor médio aproximado de 30°C, valor máximo de 31°C e mínimo de 29°C.

A radiação solar global foi superior a 500 $W.m^{-2}$ na maioria das horas de duração do experimento, valor considerado limite mínimo necessário para desinfecção eficiente com luz solar (SOMMER *et al*, 1997). Predominaram valores entre 600 e 800 $W.m^{-2}$, sendo que o maior valor (981 $W.m^{-2}$) ocorreu às 12 horas do dia 21 de novembro (Figura 3).

A Figura 4 apresenta o comportamento da concentração de oxigênio dissolvido nas amostras de água agitadas e não agitadas ao longo das seis horas de exposição.

Observa-se que a concentração inicial de oxigênio dissolvido nas garrafas agitadas foi de 6,61 mg/L e nas não agitadas de 5,56 mg/L,

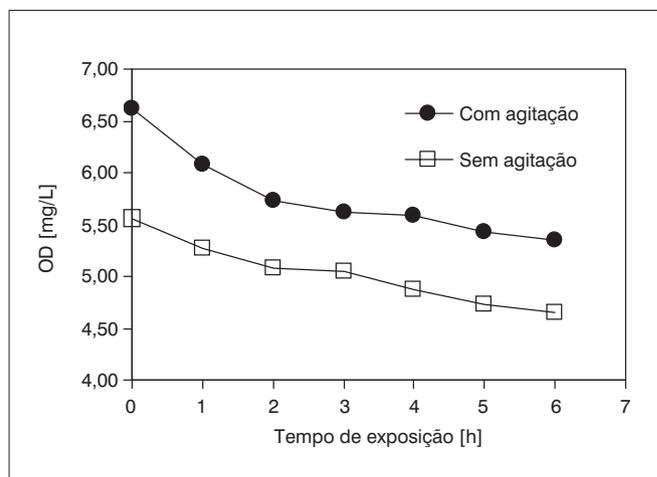


Figura 4 – Concentração média de oxigênio dissolvido das amostras de água em garrafas PET com agitação e sem agitação em função do tempo de exposição (Fortaleza, 2005)

Tabela 2 – Dados de insolação da Estação Meteorológica da UFC (Fortaleza, 2005)

Data	Horas de brilho do período diurno [h]
22/nov/05	11,2
6/dez/05	11,2
8/dez/05	10,0

havendo diferença de 1,05 mg/L. No decorrer das seis horas de exposição, a diferença foi, em média, de apenas 0,75 mg/L, mas estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

As diferenças encontradas por Meyer e Reed (2001) foram em média de 2,0 mg/L e superiores em 167% às obtidas no presente estudo. Destaca-se que as circunstâncias experimentais foram distintas: no experimento de Meyer e Reed (2001) foram utilizadas amostras agitadas durante cinco minutos antes da exposição ao sol e amostras desoxigenadas por nitrogênio. Também não houve diminuição da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo de exposição, porque as amostras agitadas eram submetidas à agitação manual de hora em hora.

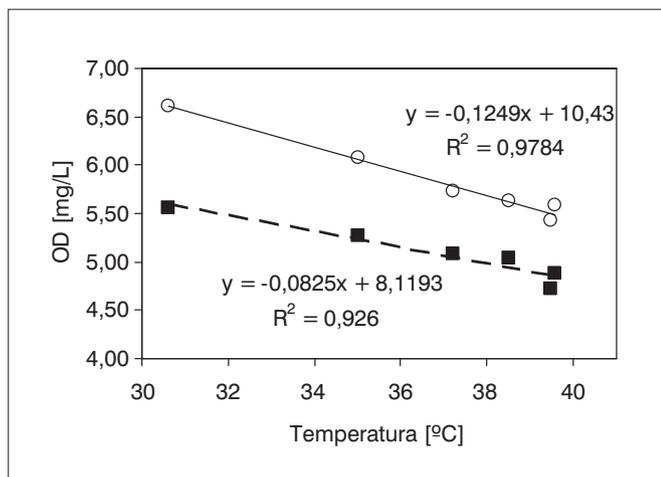
Pela análise de regressão dos dados de oxigênio dissolvido com temperatura da água para os dois procedimentos, observou-se forte correlação ($R^2 = 0,9784$ nas amostras com agitação e $R^2 = 0,926$ nas amostras sem agitação) entre as variáveis (Figura 5).

O coeficiente de decaimento de oxigênio dissolvido (k) das amostras de água agitadas ($0,1249 h^{-1}$) foi 1,5 vezes superior às amostras de água sem agitação ($0,0825 h^{-1}$ considerando-se que devido à agitação manual, a concentração inicial de OD nas amostras agitadas foi 16% superior às amostras não-agitadas (Figura 5).

Resultados semelhantes de taxas médias de decaimento de oxigênio dissolvido foram evidenciados por Kehoe *et al* (2001), sendo que nas amostras agitadas o oxigênio dissolvido decresceu duas vezes mais rapidamente do que nas amostras não agitadas, com valores de k iguais a $0,103 h^{-1}$, e de $0,053 h^{-1}$, respectivamente.

Tabela 3 – Eficiência de inativação solar de coliformes termotolerantes em garrafas PET com amostras de água com e sem agitação (valores médios e desvio padrão de três testes) (Fortaleza, 2005)

Tempo	Sem agitação			Com agitação		
	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Eficiência (Log10)	Desvio Padrão (Log10)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Eficiência (Log10)	Desvio Padrão (Log10)
0	1,03E + 06	0,000	0,49	1,03E + 06	0,000	0,49
1	2,66E + 04	1,588	0,82	2,87E + 04	1,555	0,57
2	1,15E + 03	2,952	0,51	9,79E + 02	3,022	0,56
3	1,88E + 02	3,739	0,73	1,25E + 02	3,916	0,39
4	9,69E + 01	4,027	0,80	4,62E + 01	4,348	0,79
5	3,27E + 01	4,498	0,34	2,30E + 01	4,651	1,35
6	6,67E + 01	4,189	1,35	2,60E + 01	4,598	0,77

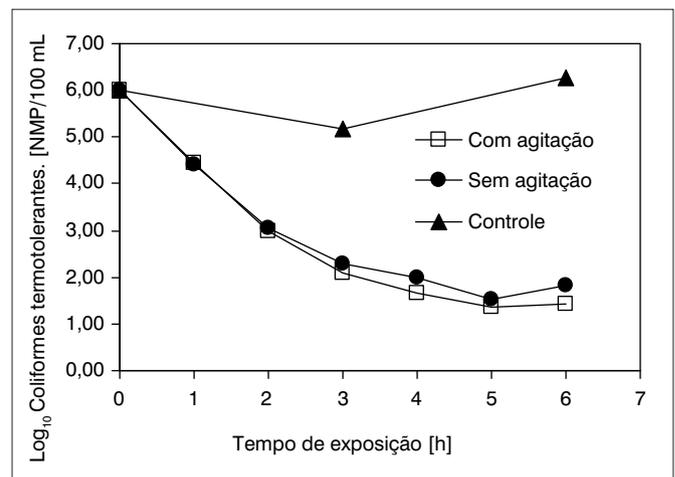
**Figura 5** – Regressão linear dos valores de oxigênio dissolvido em função da temperatura para amostras em garrafas PET agitadas (○) e não agitadas (■) (Fortaleza, 2005)

A Tabela 3 apresenta as eficiências médias de inativação de coliformes termotolerantes em amostras com agitação e sem agitação. Observa-se que a partir da terceira hora de exposição ao sol houve decaimento superior a 2 log nos dois procedimentos em estudo. Ao final das seis horas de exposição, essa eficiência foi superior a 4 log.

Os valores de desvio padrão de coliformes termotolerantes não apresentaram grande variabilidade comum em contagens bacteriana. Os maiores valores de desvio padrão, 1,35 para a sexta hora de exposição nas amostras com agitação e quinta hora nas amostras sem agitação (Tabela 3), devem-se ao fato de que nesses tempos um dos três testes apresentou inativação total de coliformes termotolerantes.

Nas amostras controle, sem exposição ao sol e preservadas à temperatura ambiente, observou-se um decréscimo de 85% de coliformes termotolerantes nas três primeiras horas e aparente recrescimento ao final das seis horas (Figura 6).

As curvas de decaimento de coliformes termotolerantes nas amostras com e sem agitação mostram-se praticamente sobrepostas, indicando eficiências similares de desinfecção nas amostras com e

**Figura 6** – Variação das concentrações médias de coliformes termotolerantes ao longo de seis horas de exposição ao sol em amostras de águas em garrafas PET agitadas, não agitadas e amostras controle. Fortaleza, 2005

sem agitação. Isso também se expressa nas constantes de decaimento bacteriano, com valor de k_b de 0,3132 e 0,2837, respectivamente para as amostras agitadas e não agitadas.

A um nível de confiança de 95%, não houve diferença significativa na eficiência de inativação de coliformes termotolerantes entre os dois métodos estudados, com e sem agitação ($p > 0,05$).

Conclusões

A desinfecção por luz solar de água acondicionada em garrafas PET mostrou o potencial de inativação de coliformes termotolerantes de até 4 unidades logarítmicas, em amostras com concentrações iniciais superiores a 10^3 NMP por 100 mL.

Entretanto, esse potencial de inativação deve ser confirmado em amostras com concentrações mais baixas de bactérias do grupo coliforme.

Por fim, os resultados não indicaram ganho de eficiência com a agitação prévia das amostras, sugerindo que esse procedimento possa ser dispensável.

Referências

- ACRA, A.; RAFFOUL, Z.; KARAHAGOPIAN, Y. *Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solution: guidelines for households application in developing countries*. Beirut: American University of Beirut/ UNICEF, 1984.
- APHA/AWWA/WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20 ed. Washington, DC: APHA, 1998.
- BRANDÃO, C.C.S. *et al. Avaliação da desinfecção solar na região centro-oeste do Brasil usando diferentes organismos indicadores de contaminação*. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES, Rio de Janeiro, 2000.
- DANIEL, L.A. *et al. Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2001.
- KEHOE, S.C. *et al. Effect of agitation, turbidity, aluminum foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors*. *Water Research*, v. 35, n. 4, p. 1061-1065, 2001.
- MEYER, V.; REED, R.H. SOLAR disinfection of coliform bacteria in hand-drawn drinking water. *Water SA*. v. 27, n. 1, 2001. [On-line]. Disponível em: <http://www.wrc.org.za/archives/watersa%20archive/2001/January/1361.pdf> Acesso em: 21 jul. 2009.
- REED, R.H. *Innovations in solar water treatment*. In: 23rd WEDC CONFERENCE WATER AND SANITATION FOR ALL: PARTNERSHIPS AND INNOVATIONS. Durban, South Africa, 1997.
- SOMMER, B. *et al. SODIS: an emerging water treatment process*. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, v. 46, n. 3, p. 127-137, 1997.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996.
- WEGELIN, M. *et al. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments*. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, v. 43, n. 3, p. 154-159, 1994.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). *Global water supply and sanitation assessment 2000 report*. Geneva, Suíça. [On-line]. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/globalassess/en/index.html. Acesso em: 16 jul. 2009.