

ANÁLISE MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA DO GRAU DE DESCONTAMINAÇÃO DE ÁGUA VIA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

LUÍS R. A. GABRIEL FILHO¹, JULIANO A. VÉRRRI², CAMILA P. CREMASCO³,
FERNANDO F. PUTTI⁴, LEONARDO R. A. GABRIEL⁵

¹ Graduado e Mestre em Matemática, Doutor e Pós-Doutor em Agronomia, Professor Assistente Doutor, UNESP - Univ Estadual Paulista, Campus de Tupã e Faculdade de Ciências Agronômicas. Fone: (0XX14) 3404-4200, gabrielfilho@tupa.unesp.br.

² Graduado e Mestre em Matemática, Professor Assistente, IFPR – Inst. Federal do Paraná, Campus Jacarezinho.

³ Graduada e Mestre em Matemática, Doutora em Agronomia, Pós-Doutora em Biometria, Professor Assistente Doutor, UNESP - Univ Estadual Paulista, Campus de Tupã e Faculdade de Ciências Agronômicas.

⁴ Bacharel em Administração, Mestre e Doutorando em Agronomia/Irrigação e Drenagem, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP - Univ Estadual Paulista, Campus de Botucatu.

⁵ Médico do AME - Ambulatório Médico de Especialidades, Tupã-SP.

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014 - Campo Grande-MS, Brasil

RESUMO: Este trabalho visou construir um sistema de desinfecção de água por energia solar com garrafas convencionais de armazenamento de água mineral, possibilitando avaliar sua eficiência frente à qualidade microbiológica da água com métodos matemáticos e estatísticos. Para a realização do experimento, foram expostos ao sol 2 grupos de garrafas, em superfícies formadas de zinco, sendo verificada a temperatura e radiação ultravioleta em momentos distintos. Para a avaliação de eficiência, foram aferidas medições de temperatura da água após vários momentos de exposição, e dos níveis de radiação ultravioleta. Durante algumas das fases de aquecimentos, foram colhidas e analisadas amostras da água para a determinação do grau de descontaminação da água. Para o grupo de amostras com água cristalina, a ação da radiação foi extremamente eficiente na eliminação dos coliformes totais, não possuindo nestas amostras coliformes fecais. No grupo de amostras com água turva, possivelmente por este grupo apresentar uma turbidez elevada, a eficácia restringiu-se somente à eliminação quase que total dos coliformes fecais, enquanto que os coliformes totais tiveram apenas um pequeno decaimento.

PALAVRAS-CHAVE: qualidade, reúso, descontaminação.

ANALYSIS OF MATHEMATICS AND STATISTICS DEGREE WATER DECONTAMINATION VIA ULTRAVIOLET RADIATION

ABSTRACT: : This work aims to construct a system of disinfection of water by solar energy with conventional storage bottles of mineral water, enabling the evaluation of its effectiveness against the microbiological quality of the water with mathematical and statistical methods. To perform the experiment, were exposed to the sun 2 groups of cylinders formed on zinc surfaces, being checked for temperature and ultraviolet radiation at different times. To evaluate the efficiency measurements of water temperature were measured after various times of exposure, and levels of ultraviolet radiation. During some phases of heating, samples were taken and analyzed to determine the water level of the water decontamination. For the group of samples with crystal clear water, the action of radiation was extremely efficient in removing total coliforms, fecal coliforms not having these samples. In the group of turbid samples, this group possibly have a high turbidity, the efficacy is restricted only to the almost total elimination of fecal coliform, whereas coliforms were only a small

decay.

KEYWORDS: quality, reuse, decontamination

INTRODUÇÃO

A água se torna algo indispensável para a existência de vida na terra, e atualmente no nosso planeta a quantidade de água existente corresponde a $\frac{3}{4}$ de toda a superfície, ou seja, seu volume é em torno de 523 milhões de km³, desse valor total, aproximadamente 97 % estão nos oceanos e mares, 2,2% está em forma de gelo, que são as geleiras polares e geleiras montanhosas e apenas 0,6% corresponde às águas de rios, lagos e lençóis subterrâneos, e que são apropriadas para o consumo humano. (TUNDISI,2003).

Segundo a FAO (2012) em torno de 80 % da população mundial vive em áreas que o abastecimento de água potável não é assegurado, ou seja, 3,4 milhões de pessoas enfrentam ameaças com a falta de água. De acordo com IBGE(2010), no Brasil o abastecimento de água está em cerca de 99% dos municípios, porém a coleta de esgoto sanitário esteja em torno de 55% dos municípios e o tratamento atingindo apenas 28% dos municípios.

Assim diversos pesquisadores estudam métodos para reduzir ou eliminar parasitas e tornar água mais apropriada ao consumo, Sommer (1998), aplicou irradiação em água contaminada com *E. coli*, apresentou uma redução significativa na quantidade. Outros métodos utilizados por pesquisadores é o tratamento de água com UV, diversos autores obtiveram resultados positivos na redução da contaminação (MEUNIER, 2006), Anipsitakis (2004), Jorquera (2002).

O método em que se utiliza a irradiação vem ganhando destaque, pois apresenta baixo custo e fácil uso para a realização dessa prática em regiões isoladas e com problemas com água potável (WISBECK,2011), e como o Brasil apresenta alta potência de irradiação isso facilita a utilização dessa tecnologia (SÁNCHEZ-ROMÁN et al. 2008). Objetivo do presente trabalho foi analisar estatisticamente e matematicamente a eficiência da ação da radiação ultravioleta para a descontaminação de água.

MATERIAL E MÉTODOS

Os grupos de garrafas foram formados por água de afluentes com características diferentes; afluente (A), com água relativamente parada e afluente (B) com água corrente e com maior turbidez. Foram eleitos afluentes com certo grau de contaminação na cidade de Emilianópolis, estado de São Paulo. Tal metodologia pretendeu desta forma, obter águas contaminadas para avaliar a real eficácia do sistema de desinfecção proposto.

Para a medição periódica da temperatura das garrafas PETs, foi usado um termômetro infravermelho da marca MT-350, e para mensuração da radiação ultravioleta, foi utilizado o sensor da marca UVR 138.

Para a realização do experimento, foram expostos ao sol 2 grupos de 6 garrafas em uma superfície de zinco em um dia ensolarado. As garrafas foram enumeradas de forma que o Grupo A continha às garrafas de 1 a 6 e o Grupo B as garrafas de 7 a 12. O tempo de exposição ao sol de cada garrafa está descrito na Tabela 1.

TABELA 1. Garrafas e o tempo de exposição solar das mesmas. **Bottles and sun exposure time is the same**

Garrafas	Tempo de exposição solar (horas)
1 e 7	0
2 e 8	0,5
3 e 9	1
4 e 10	2

5 e 11	4
6 e 12	6

A temperatura e a radiação foram verificadas a cada meia hora. O experimento foi iniciado às 10 horas, tendo seu término, portanto às 16 horas. Para a realização da análise de microrganismos foi utilizada técnica da membrana filtrante, pois este método de análise quantitativo que permite determinar o número de unidades formadoras de colônias (UFC) dos microrganismos alvo na amostra (coliformes totais, coliformes fecais ou *E.coli*), baseado na filtração de um determinado volume através de um filtro de membrana com poro de 0,45µm.

As bactérias, cuja dimensão é maior que a dos poros, fica retidas na membrana, transferida então para uma placa de Petri contendo o meio de cultura seletivo e diferencial, para visualização de colônias típicas.

A técnica da membrana filtrante é uma metodologia de concentração de microrganismos, recomendada à análise de amostras nas quais se espera ausência ou contagens muito baixas do microrganismo alvo, abaixo do limite de detecção das técnicas de plaqueamento convencionais (SILVA, 2005). Por esse motivo, sua principal aplicação é a análise de água destinada ao consumo humano (filtração de 100ml da amostra), embora possa ser utilizada para outros tipos de água, selecionando-se volumes adequados à concentração dos microrganismos presentes.

A temperatura da água, os níveis de radiação ultravioleta e as quantidades de coliformes obtidos experimentalmente foram analisados de duas formas.

O primeiro método consistiu na análise estatística dos dados obtidos, para a verificação da existência de diferenças estatísticas entre os resultados obtidos nos dois métodos utilizou-se o teste t de Student.

O segundo método consistiu na utilização de derivadas discretas a fim de obtermos a taxa de variação do decaimento dos coliformes em relação ao tempo de exposição solar.

Segundo Gabriel Filho (2011), Considerando-se a função $f: N.h \rightarrow R$ onde $h > 0$ é um número real fixo e $Nh = \{n.h: n \in N\}$, é possível definir a “derivada discreta” de f no ponto nh , $n \in N$, denotada por \dot{f} , da seguinte forma:

$$\dot{f}(nh) = \frac{f((n+1).h) - f(nh)}{h}$$

Porém, neste trabalho, utilizaram-se tempos com intervalos consecutivos diferentes. Assim, adotou-se a função $f: D \rightarrow R$, com o conjunto de discretização D definido da forma $D = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} = \{0, \frac{1}{2}, 1, 2, 4, 6\}$. Desta forma, a “derivada discreta” de f no ponto x_i , $1 \leq i \leq 5$, denotada por \dot{f} , da seguinte forma:

$$\dot{f}(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

Portanto, utilizou-se efetivamente para cálculo da derivada discreta as seguintes relações:

$$\begin{aligned} i = 1 &\Rightarrow \dot{f}(x_1) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \\ i = 2 &\Rightarrow \dot{f}(x_2) = \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2} \\ i = 3 &\Rightarrow \dot{f}(x_3) = \frac{f(x_4) - f(x_3)}{x_4 - x_3} \\ i = 4 &\Rightarrow \dot{f}(x_4) = \frac{f(x_5) - f(x_4)}{x_5 - x_4} \\ i = 5 &\Rightarrow \dot{f}(x_5) = \frac{f(x_6) - f(x_5)}{x_6 - x_5} \end{aligned}$$

Vale ressaltar que $\dot{f}(x_6)$ não existe em virtude de não existir o ponto seguinte $x_{6+1} = x_7$.

Para a determinação da correlação entre os tempos decorridos pela incidência da radiação ultravioleta e as variações entre as observações de coliformes totais, foi calculado o coeficiente de Pearson para avaliar o grau de correlação das duas variáveis em estudo (tempo e coliformes totais), atribuindo um valor real entre -1 e 1.

Vale ressaltar que, se $r = 1$ diz-se que duas variáveis possuem correlação perfeita positiva, se $r = -1$, as duas variáveis possuem correlação perfeita negativa, e se $r = 0$, não existe correlação entre as variáveis.

Para a elaboração dos modelos estatístico, foi realizado através de regressão polinomial (linear ou quadrática) ($p \leq 0,05$). Utilizando o teste t de Student no programa Minitab® Statistical Software 16, foi realizada a comparação entre a temperatura da água dos grupos de garrafas A e B.

Também foram obtidas equações de estimativas de evolução do comportamento da temperatura e da radiação ultravioleta, correlacionando tais variáveis com os resultados laboratoriais da qualidade da água.

Para a determinação de um ajuste matemático para uma curva que represente a quantidade de coliformes ao decorrer do processo, utilizou-se a integração da função obtida do ajuste dos pontos da variação discreta.

Por fim, vale ressaltar que a referência à quantidade de coliformes no decorrer do trabalho representa a quantidade de unidades formadoras de colônias de coliformes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da utilização do sensor ultravioleta, foi possível realizar as medições de radiação, sendo assim estabeleceu uma relação matemática do comportamento de tais medições para o presente estudo.

A função mais conveniente em virtude do regime solar foi a função quadrática, apresentando um alto valor de R^2 (0,9052). A função obtida, dada por $y = -0,243x^2 + 1,836x + 5,076$, está representada na Figura 1, bem como os dados experimentais obtidos.

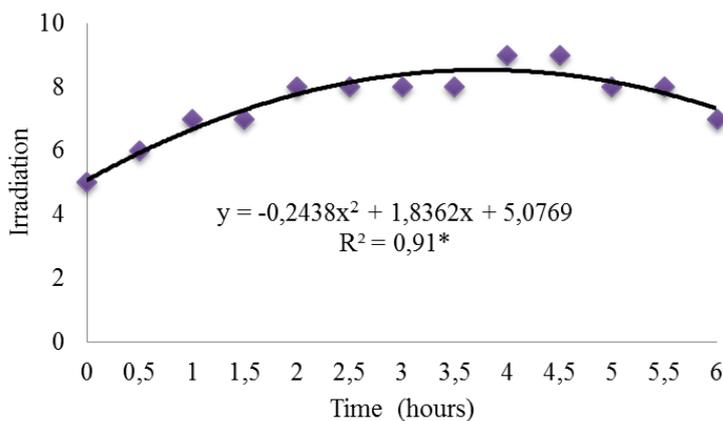


FIGURA 1. Aproximação polinomial dos dados da Radiação. **Polynomial approximation of the radiation data.**

Com as observações registradas de temperatura das garrafas PETs, foi possível estabelecer uma relação matemática aproximada do comportamento da temperatura de cada grupo de garrafas em função do tempo de exposição solar.

A função mais conveniente para a descrição do comportamento da temperatura da água do Grupo A (água cristalina) em virtude do regime solar foi a função quadrática, apresentando um alto valor de R^2 (0,8865) e apresentou significância, sendo que a função está representada na Figura 2, bem como os dados experimentais obtidos.

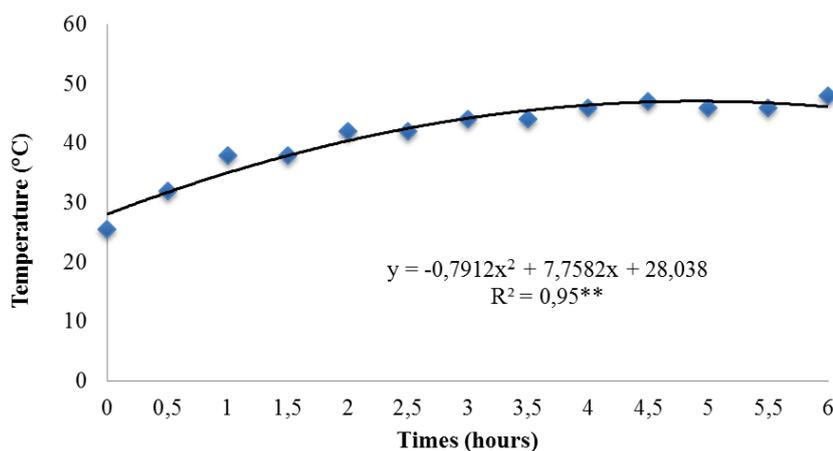


FIGURA 2. Interpretação polinomial da temperatura da água do Grupo A em função do tempo.
Interpretation polynomial water temperature of Group A as a function of time.

Para a descrição do comportamento da temperatura da água do Grupo B (água turva), foi aproximada a função quadrática $y = -0,791x^2 + 7,758x + 28,03$, apresentando um alto valor de R^2 (0,949) e sendo significativa. A função está representada na Figura 3, bem como os dados experimentais obtidos.

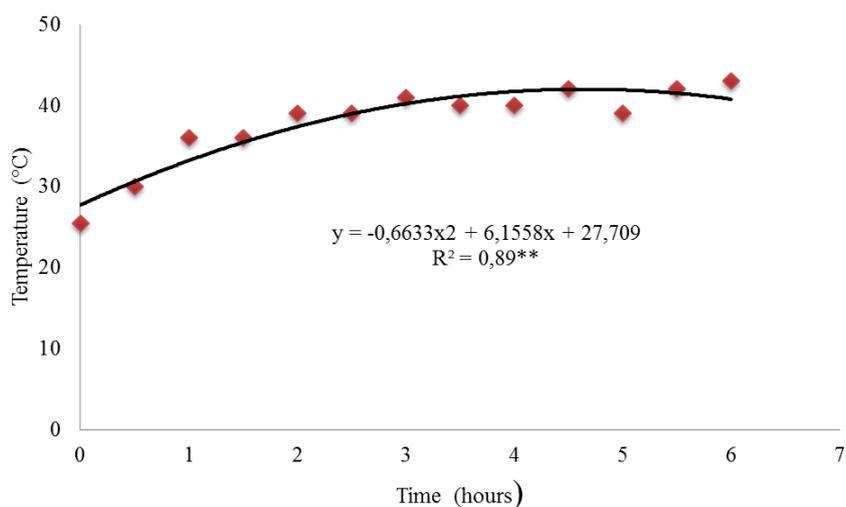


FIGURA 3. Interpretação polinomial da temperatura da água do Grupo B em função do tempo.
Polynomial interpretation of the water temperature in group B versus time.

As faixas de temperaturas dos grupos de água foram diferentes possivelmente devido ao fato de que o Grupo B apresentava uma turbidez elevada, diferentemente do Grupo A.

Esta diferença entre os grupos em relação à temperatura foi constatada utilizando o teste t de Student para observações pareadas. O teste t apresentou um valor de $p < 0,0001$.

Através das observações do decaimento de Coliformes totais que está na Figura 4, foi possível determinar as variações (por derivadas discretas) decorrentes de cada observação, conforme indica a Tabela 2.

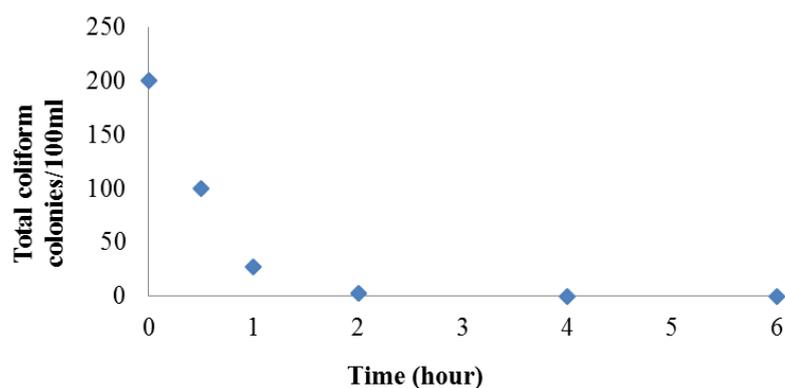


FIGURA 4. Quantidade de colônias de coliformes totais do Grupo A para amostras de 100 ml. **Amount of total coliform colonies of Group A to 100 ml samples.**

TABELA 2. Dados sobre Coliformes totais do Grupo A e variações (derivadas discretas) entre as observações de tempo. **Data on total Coliforms in Group A and variations (discrete derivative) between the observations of time.**

Coliformes totais - Grupo A		
<i>Tempo</i> (horas)	<i>Coliformes totais</i> $f(x)$	<i>Variação</i> $f'(x)$
0	200	-200
0,5	100	-146
1	27	-24
2	3	-1,5
4	0	0
6	0	—

Calculando-se o coeficiente de correlação *Pearson* entre “tempo decorrido” e a “quantidade de coliformes totais”, obteve-se o valor $R = -0,704$, representando uma correlação negativa entre tais variáveis, indicando um dos principais objetivos do trabalho relativos à diminuição da quantidade de coliformes totais (decaimento) ao decorrer da ação da radiação ultravioleta.

Para as variáveis “tempo decorrido” e “variação dos coliformes totais”, obteve-se o valor $R = 0,780$, representando uma correlação positiva entre tais variáveis. Portanto, ao decorrer do tempo de exposição das garrafas ao sol, as variações tendem a tornar-se positivas, o que também indica um término da ação da radiação na água.

Este dois coeficientes calculados (-0,704 e 0,780) mostram, portanto que a diminuição dos coliformes ocorre e, ao passar uma exposição considerável de radiação, a variação deixa de ocorrer, o que acontece devido a praticamente extinção da quantidade de coliformes totais.

Em virtude do decaimento observado na Figura 4 sobre a quantidade de colônias de coliformes totais do Grupo A em relação ao tempo de exposição, a curva mais apropriada seria um ajuste por função exponencial. Vale ainda ressaltar que este decaimento é também constatado através da Tabela 10 com os valores das derivadas discretas, constituídos de uma sequência crescente de números negativos. A função obtida, conforme a Figura 5 é dada por $y = 235,22e^{-2,1555x}$ apresentando um alto valor de R^2 (0,992). Vale ressaltar que esta função foi inicialmente determinada utilizando os dados observados até 2 horas de exposição ao sol, em virtude de após este período, a quantidade de coliformes ser nula.

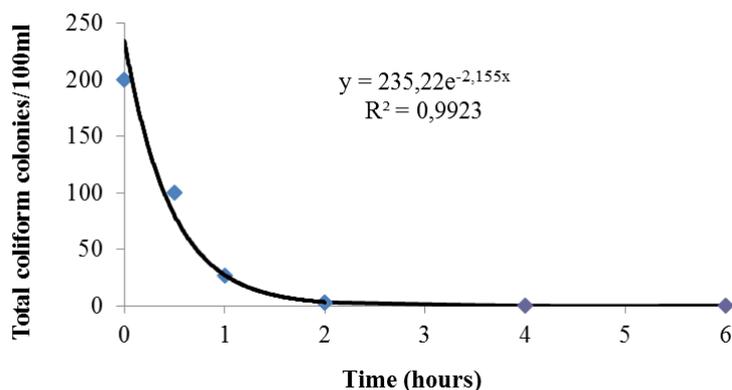


FIGURA 5. Ajuste da quantidade de colônias de coliformes totais do Grupo A em função do tempo. **Adjust the amount of total coliform colonies of Group A as a function of time.**

Através das observações do decaimento de Coliformes totais que está na Figura 6, foi possível determinar as variações (por derivadas discretas) decorrentes de cada observação, conforme indica a Tabela 3.

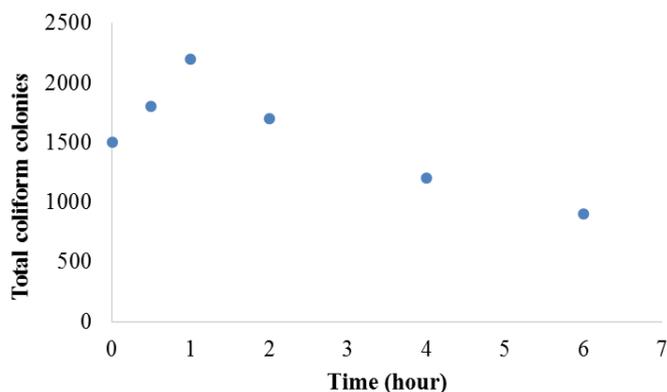


FIGURA 6. Quantidade de colônias de coliformes totais do Grupo B para amostras de 100 ml. **Amount of total coliform colonies from Group B to 100 ml samples.**

TABELA 3. Dados sobre Coliformes totais do Grupo B e variações (derivadas discretas) entre as observações de tempo. **Data on total Coliforms in Group B and variations (discrete derivative) between the observations of time.**

Coliformes totais - Grupo B		
<i>Tempo</i> (horas)	<i>Coliformes totais</i> $f(x)$	<i>Variação</i> $f'(x)$
0	1500	600
0,5	1800	800
1	2200	-500
2	1700	-250
4	1200	-150
6	900	—

O comportamento não uniforme da quantidade de coliformes neste Grupo B não induz à utilização de correlações para interpretações dos resultados obtidos. O decaimento neste caso ocorre

a partir de 1 hora de exposição ao sol, haja vista que a derivada troca de sinal exatamente neste ponto. Este fato caracteriza um ponto de máximo no conjunto de dados.

Assim, foi realizado um ajuste exponencial (da mesma forma como no Grupo A) mas a partir de 1 hora de exposição. A função obtida conforme a Figura 7 é dada por $y = 2508,7e^{-0,17556x}$, $1 \leq x \leq 6$, apresentando um alto valor de R^2 (0,9882).

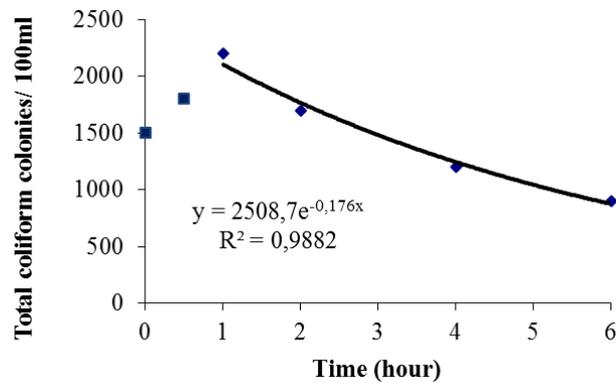


FIGURA 7. Ajuste da quantidade de colônias de coliformes totais em função do tempo a partir do decaimento dos coliformes. **Adjust the amount of total coliform colonies versus time from the decay of coliforms.**

No Grupo A não continha coliformes fecais (apresentaram ausência). Já no Grupo B, existiam 700 e, após a utilização do sistema, foram praticamente eliminados, conforme ilustra a Figura 8.

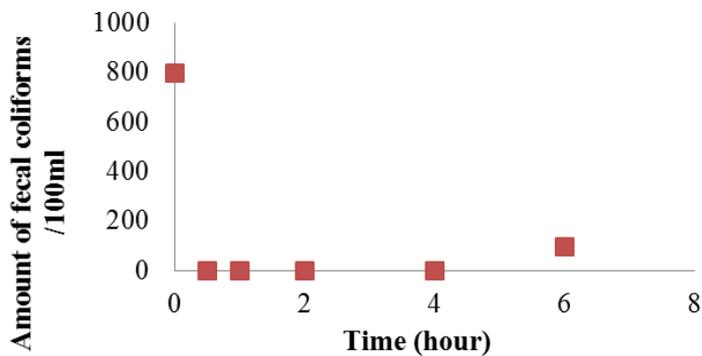


FIGURA 8. Quantidade de colônias de coliformes fecais do Grupo B para amostras de 100 ml. **Amount of fecal coliform colonies of Group B to 100 ml samples.**

Portanto, o processo mostrou-se também extremamente eficiente na eliminação dos coliformes fecais. Em termos percentuais, se a quantidade inicial de coliformes fecais representar 100%, pode-se observar na Figura 9 a alta taxa de eliminação deste tipo de microorganismo.

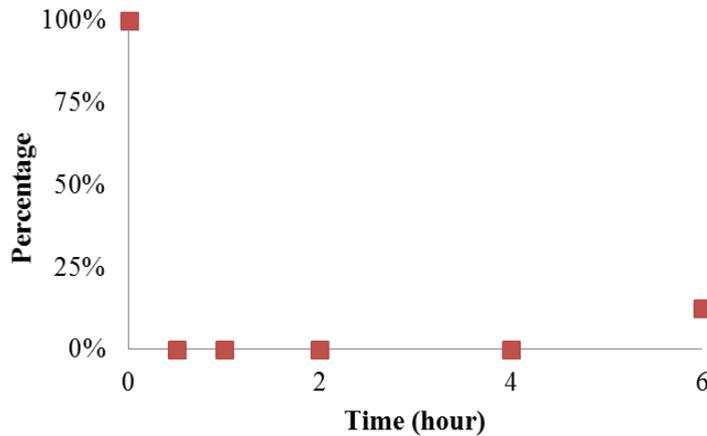


FIGURA 9. Porcentagem em relação à quantidade de coliformes fecais. **Percentage relative to the amount of fecal coliform.**

Portanto, o processo mostrou-se também extremamente eficiente na eliminação dos coliformes fecais. Em termos percentuais, se a quantidade inicial de coliformes fecais representar 100%, pode-se observar na Figura 9 a alta taxa de eliminação deste tipo de microorganismo.

CONCLUSÕES

A partir do sistema de desinfecção de água por energia solar, foi possível verificar a eficiência da ação da radiação ultravioleta na eliminação de coliformes nas amostras de água.

Para o grupo de amostras com água cristalina (Grupo A), a ação da radiação foi extremamente eficiente na eliminação dos coliformes totais, pois inicialmente haviam 200 colônias mensuradas destes coliformes por cada amostra de 100 ml e, após a exposição solar por 2 horas, as colônias foram eliminadas.

Para o grupo de amostras com água turva (Grupo B), a ação da radiação também foi mensurada na eliminação dos coliformes. Porém, em virtude possivelmente deste grupo apresentar uma turbidez elevada, a ação do sistema foi amenizada, visto que a incidente da luz teve sua ação reduzida.

Inicialmente, a diferença dos grupos pode ser notada na análise da temperatura da água, na qual a média da temperatura do Grupo B (41,4 °C) foi diferente ($p < 0,0001$) da temperatura do Grupo A (37,9 °C).

Assim, o grupo com água turva, com inicialmente 1500 colônias de coliformes totais por cada amostra de 100 ml, passou a ter 900 colônias depois de decorrida às 6 horas de exposição. Além disto, após na primeira hora de exposição, ocorreu um aumento das colônias, o que possivelmente ocasionou uma proliferação em virtude das condições de temperatura e turbidez.

Ainda assim, o método proporcionou uma diminuição de 40 % de colônias mensuradas inicialmente (600 colônias). Porém, neste grupo, a diminuição na quantidade de coliformes fecais foi extremamente eficaz, visto que existiam 800 colônias inicialmente e, ao fim do processo, havia 100 colônias (diminuição de 87%).

Por fim, vale ressaltar a importância das curvas de ajuste obtidas nos modelos, que podem vir a ser utilizadas como suporte para previsão das quantidades de coliformes no tempo de observação decorrido.

REFERÊNCIAS

ANIPSITAKIS, G. P.; DIONYSIOU, D. D. Transition metal/UV-based advanced oxidation technologies for water decontamination. *Applied Catalysis B: Environmental*. v.54, n. 3, p. 155-163, 2004.

FAO. Disponível em <http://www.fao.org/>. Acessado em 15 de março de 2012.

GABRIEL FILHO, L. R. A., PEREIRA, D. F., BARATO, F. F., & De MAGALHÃES, M.M. Method of numerical correction of errors occasioned by delay of records during the monitoring of environmental variables of interest for animal production. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 5, p. 835-846, 2011.

JORQUERA, M. A.; VALENCIA, G.; KATAYOSE M. E. M.; RIQUELME, C. Disinfection of seawater for hatchery aquaculture systems using electrolytic water treatment. *Aquaculture*. v.207 n.3-4 p. 213-224, 2002.

MEUNIER, L.; CANONICA, S.; VON GUNTEN, U. Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality. *Water Research*. v.40, n.9, p. 1864-1876, 2006.

MORAES, D.S.L; JORDÃO, B.Q.. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista Saúde Pública* v. 36, n.3, p.1-8, 2010.

TUNDISI JG. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. *Ciência Cult* (São Paulo) 2003; 4:31-3.

SANCHEZ-ROMAN, R. M., SOARES, A., DE MATOS, A. T., SEDIYAMA, G. C., De Souza, O., MOUNTEER, A. H. Potential use of solar radiation to disinfect domestic wastewater in Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*. v. 2, n. 3, p. 283-294, 2008.

SOMMER, R.; HAIDER, T.; CABAJ, A.; PRIBIL, W. ; LHOTSKY, M. Time dose reciprocity in UV disinfection of water. *Water Science and Technology*. v. 38 n.12, p.145-150, 1998.

WISBECK, E., SANDRI, E. K., SOARES, A. L., & MEDEIROS, S. H.. Disinfection of rainwater by ultraviolet radiation. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.16, n.4, p. 337-342, 2011.