

Estimativa do tempo de exposição à radiação solar para desinfecção de águas residuárias domésticas

J. G. T. Queluz¹; D. A. P. Nicolete²; T. R. Alves¹; R. M. Sánchez-Román¹

¹Departamento de Engenharia Rural/Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 18610-307, Botucatu-SP, Brasil

² Departamento de Solos e Recursos Ambientais/Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 18610-307, Botucatu-SP, Brasil

queluz@fca.unesp.br

(Recebido em 20 de maio de 2014; aceito em 04 de março de 2015)

O reúso de águas residuárias domésticas na agricultura é uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos. No entanto, essas águas contêm patógenos que devem ser previamente inativados. Uma opção promissora para tratamento dessas águas é a desinfecção solar. Portanto, o objetivo deste trabalho foi estimar o tempo de exposição à radiação solar necessário para desinfecção de águas residuárias domésticas até níveis adequados para reutilização agrícola, considerando as variações espaciais e temporais da incidência de radiação solar no estado de São Paulo. Para isso, foi utilizado um modelo matemático que representa a população remanescente de coliformes fecais em águas residuárias após exposição a uma determinada dose de radiação solar e dados de radiação solar obtidos pelo projeto SWERA. A partir disso, foram gerados 12 mapas da eficiência da desinfecção solar, para todas as estações do ano e para três concentrações de sólidos suspensos totais na água residuária doméstica. Os resultados indicaram que a eficiência da desinfecção solar varia de acordo com as estações do ano, sendo que os melhores resultados são obtidos na primavera e os piores no inverno. Além disso, foi observado que quanto menor a concentração de sólidos suspensos, maior o potencial de aplicação da desinfecção solar no estado de São Paulo.

Palavras chave: SODIS; Águas residuárias domésticas; Reúso Agrícola.

Estimation of solar radiation exposure time required for domestic wastewater disinfection.

The reuse of domestic wastewater in agriculture is an important procedure for the management of water resources. However, these waters contain pathogens which must be previously inactivated. A promising option for the treatment of these waters is solar disinfection. Therefore, the aim of this study was to estimate the time of exposure to solar radiation required for disinfection of domestic wastewater to appropriated levels for agricultural reuse, considering variations of spatial and temporal incidence of solar radiation in the state of São Paulo, Brazil. For this, a mathematical model was used, which represents the remaining population of fecal coliforms in wastewater after its exposure to a certain dose of solar radiation and the solar radiation data were obtained from the SWERA project. From this, 12 maps were generated to represent the efficiency of solar disinfection for all seasons and for three concentrations of total suspended solids in domestic wastewater. The results indicate that the efficiency of solar disinfection varies from season to season. Besides, the best results are obtained in the spring and worse in winter. Moreover, it was observed that the lower the concentration of suspended solids, the greater the potential application of solar disinfection in the state of São Paulo.

Keywords: SODIS; Domestic wastewater; Agricultural reuse.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional das últimas décadas teve como consequência o aumento na demanda pelos recursos hídricos tanto para a produção de alimentos quanto para o abastecimento urbano. Também, o lançamento de resíduos sem tratamento tem afetado negativamente a qualidade das águas. Além disso, as fontes de água de boa qualidade estão se tornando cada vez mais escassas e, em muitas regiões do mundo, não há disponibilidade de água para suprir as necessidades diárias da população. Estes fatos indicam que os recursos hídricos estão sendo contaminados de maneira descontrolada e mostram a importância de se envidar todos os esforços para a preservação dos recursos hídricos.

Nesse contexto, o reúso de águas residuárias domésticas (ARD) é uma importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos, uma vez que permite uma redução na demanda por água de boa

qualidade e diminui o lançamento de efluentes em corpos receptores. Além disso, as águas residuárias são fontes potenciais de água e nutrientes para as culturas agrícolas. Entretanto, as ARD possuem microrganismos patogênicos que devem ser inativados antes da sua disposição final no solo.

Para isso, diversos tipos de tratamento de ARD poderiam ser utilizados, entre eles, pode-se citar a desinfecção solar (SODIS), que é um método de baixo custo, fácil utilização, pouca manutenção, não gera subprodutos tóxicos e, portanto, pode ser facilmente adotado por comunidades rurais isoladas e de baixa renda [1].

Diversos estudos comprovaram a ação bactericida da radiação solar e sua eficiência na desinfecção de água para consumo humano [2, 3, 4]. Tendo em vista que a maioria dos trabalhos com SODIS tem enfoque no tratamento de água para consumo, Sánchez-Román et al. [5] desenvolveram um reator para desinfecção solar de ARD e os resultados indicam que a SODIS pode ser utilizada para desinfetar águas residuárias domésticas até níveis adequados para o reúso na agricultura.

Com o intuito de aprimorar o reator desenvolvido por Sánchez-Román et al. [5], Queluz e Sánchez-Román [6] desenvolveram e avaliaram a eficiência de um reator solar com formato de tronco cônico invertido e propuseram um modelo matemático que representa a população remanescente de coliformes fecais (CF) em águas residuárias após exposição a uma determinada dose de radiação UV. Tendo em vista a variabilidade espacial e temporal da radiação solar incidente na superfície terrestre, a espacialização desse modelo permitiria estimar a potencialidade do uso da desinfecção solar para tratamento de ARD até níveis adequados para reúso na agricultura em diferentes regiões e estações do ano [7].

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi estimar o tempo de exposição à radiação solar necessário para desinfecção de ARD até níveis adequados para reúso agrícola, considerando as variações espaciais e temporais da incidência de radiação solar no estado de São Paulo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, foi estimado o tempo de exposição à radiação solar necessário para desinfecção de ARD até níveis adequados para reúso agrícola no estado de São Paulo. Para isso, foram utilizados dados de incidência de radiação solar e o modelo desenvolvido por Queluz e Sánchez-Román [6].

2.1 Modelo de desinfecção

A Equação 1 mostra o modelo matemático que representa a população remanescente de CF em águas residuárias após exposição a uma determinada dose de radiação UV [6].

$$(1) \quad \frac{N}{N_0} = \frac{1}{10^{(1,254741+0,703179RUV-0,006492SST)}}$$

Em que N é a população remanescente de *Escherichia coli* após a ARD ser expostas à componente UV da radiação solar (NMP 100 mL⁻¹); N₀ é a população inicial de *Escherichia coli* presente na ARD (NMP 100 mL⁻¹); RUV é a dose de radiação UV-A acumulada (MJ m⁻²); e SST é a concentração de sólidos suspensos totais (mg L⁻¹).

Conforme é possível notar na Equação 1, a concentração de SST tem influência direta na inativação de CF. Portanto, considerando valores fixos de SST, N e N₀, pode-se calcular a dose de radiação UV (RUV) necessária para a desinfecção do efluente.

Por exemplo, considerando uma ARD com 0 mg L⁻¹ de SST, uma população inicial de CF de 10⁷ NMP 100 mL⁻¹ e uma população final de CF de 1000 NMP 100 mL⁻¹, seria necessária uma dose mínima de RUV de 3,9 MJ m⁻². Entretanto, se a concentração de SST for de 200 mg L⁻¹, a dose necessária de RUV seria de 5,75 MJ m⁻². Neste trabalho, o valor final de CF foi adotado de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Saúde [8] para reúso irrestrito de ARD na agricultura (≤1000 NMP 100 mL⁻¹) e o valor inicial de CF adotado foi de 10⁷ NMP 100 mL⁻¹ que corresponde à concentração média de CF em um efluente de tanque séptico [9].

2.2 Radiação Solar

Os dados de radiação solar global utilizados neste trabalho foram oriundos da estimativa da radiação solar realizada para o Brasil, como parte do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assesment), que gerou bases de dados para uso em projetos de aproveitamento de energia renovável [10]. No projeto SWERA, foi adotado o modelo Brasil-SR, que é um modelo físico para obter estimativas da radiação solar incidente na superfície, integrando dados advindos de estações meteorológicas e de satélites geoestacionários [11, 12].

O modelo foi desenvolvido na Alemanha e posteriormente aperfeiçoado e adaptado às condições brasileiras pelo LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), gerando o Atlas Brasileiro de Energia Solar [13]. Tendo em vista que o modelo de Queluz e Sánchez-Román [6] utiliza apenas a radiação UV, os dados de radiação solar obtidos foram multiplicados por 0,05, que representa a componente UV da radiação solar global [14].

2.3 Elaboração dos mapas

A base de dados contendo os valores de radiação solar foi adquirida no formato *shapefile*, em um arquivo com feições do tipo polígono, ou seja, vetorial, que pode ser manipulado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para o processamento dos dados e obtenção da distribuição espacial do número de dias necessários para a desinfecção de águas residuárias adotou-se o programa ArcGIS 10.1 [15].

Inicialmente, no programa, foi realizado o recorte da área de interesse através da ferramenta *clip* onde foram selecionados apenas os polígonos contidos na área interna do estado de São Paulo. O passo seguinte foi a conversão de formatos, de vetor para *raster*. Nesta fase, o arquivo original é convertido para um formato matricial (*raster*), onde a menor unidade passa a ser o pixel, e cada pixel assume um valor desejado, no caso esse valor já estava contido na tabela de atributos do arquivo original. Com isso, obtiveram-se quatro mapas em formato *raster* com as médias diárias da radiação solar para as quatro estações do ano, verão, outono, inverno e primavera. Para a conversão utilizou-se a ferramenta *polygon to raster*.

Os mapas em formato *raster* permitem uma série de operações entre eles, como booleanas e matemáticas, às quais se atribui o nome de álgebra de mapas [16]. O SIG permite o uso de álgebra de mapas a partir da ferramenta *raster calculator*, na qual é possível escrever equações, sendo o mapa, uma das variáveis de entrada. Com isso, foi possível aplicar o modelo proposto por Queluz e Sánchez-Román [6] a cada um dos mapas representativos das estações do ano e determinar o tempo de exposição necessário para a desinfecção, através de uma divisão entre os dados fornecidos pelo modelo e os dados de RUV incidente.

Além das distribuições de radiação solar das estações do ano, foram utilizadas três concentrações de SST na ARD (0, 100 e 200 mg L⁻¹), totalizando 12 mapas, sendo que todos os mapas gerados estão no Sistema de Coordenadas Geográficas com Datum WGS 84.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial do tempo necessário para reduzir o número de CF em ARD até níveis adequados para a aplicação na agricultura, para as estações do ano e diferentes concentrações de SST está apresentada nas Figuras 1, 2 e 3.

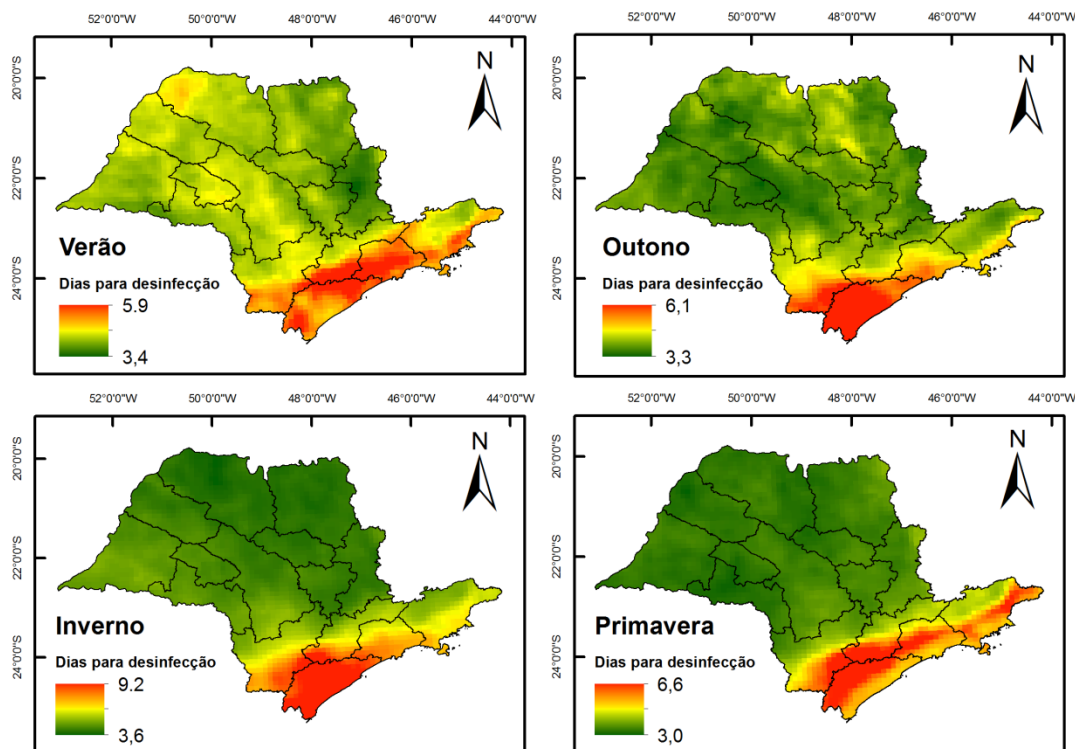


Figura 1: Tempo de exposição à radiação solar para reduzir uma população inicial de CF de 10^7 até 1000 NMP mL^{-1} em ARD com concentração de 0 mg L^{-1} de SST.

Observa-se que a concentração de SST foi um fator determinante no tempo necessário à exposição da ARD à RUV, existindo uma correlação positiva entre essas variáveis. Resultados semelhantes foram relatados por Queluz e Sánchez-Román [6].

A região litorânea do estado apresentou situações mais críticas em termos de aplicação da SODIS, sendo que o tempo necessário para desinfecção da ARD nessa região variou de 5,9 a 13,6 dias, mostrando que, mesmo nas melhores condições, o processo torna-se inviável, pois não há garantia de que as condições climáticas se manterão estáveis durante o período de tratamento.

Em contrapartida, as demais regiões apresentam-se como mais favoráveis ao tratamento de ARD utilizando a SODIS, pois para uma concentração de SST igual a 0 mg L^{-1} , o tempo necessário de exposição à RUV é inferior a 5 dias. Esse tempo de exposição manteve-se mesmo com o aumento da concentração de SST para 100 mg L^{-1} . No entanto, para uma concentração de SST igual a 200 mg L^{-1} o tempo de exposição passa a ser superior a 5 dias, com exceção da primavera, para a maior parte do estado. Esses dados indicam que para concentrações de SST $\geq 200 \text{ mg L}^{-1}$ o uso da SODIS no tratamento de ARD torna-se inviável. Esse fato ocorre devido aos SST agirem como barreiras, absorvendo e impedindo a penetração da radiação solar e, conseqüentemente, protegendo os microrganismos [17].

Com relação às estações do ano, a primavera apresenta as melhores condições para uso da SODIS para todas as concentrações de SST. O modelo Brasil-SR considera como uma das suas principais variáveis de entrada para estimativa da radiação solar, a cobertura de nuvens [11] e, como no estado de São Paulo o verão é caracterizado por uma estação chuvosa, ou seja, com alta nebulosidade, ocorre uma redução da radiação solar que incide na superfície, fazendo com que esta estação seja menos favorável ao uso da SODIS do que a primavera. Além disso, a nebulosidade é o fator que inviabiliza o uso da SODIS na região litorânea em todas as estações do ano independente das concentrações de SST, pois reduz em dois terços a incidência de radiação UV-A na superfície terrestre [18].

Sabe-se que a redução na incidência de radiação solar está relacionada com o aumento da latitude que, portanto, tem influência direta na eficiência da SODIS. Por exemplo, nas Figuras 1, 2 e 3 é possível observar um gradiente de redução na eficiência da SODIS no sentido da menor

para a maior latitude. As regiões mais adequadas para utilização da SODIS ficam localizadas entre as latitudes 35°N e 35°S, onde a incidência da radiação solar é maior e, também, onde está localizada a maioria dos países em desenvolvimento [18].

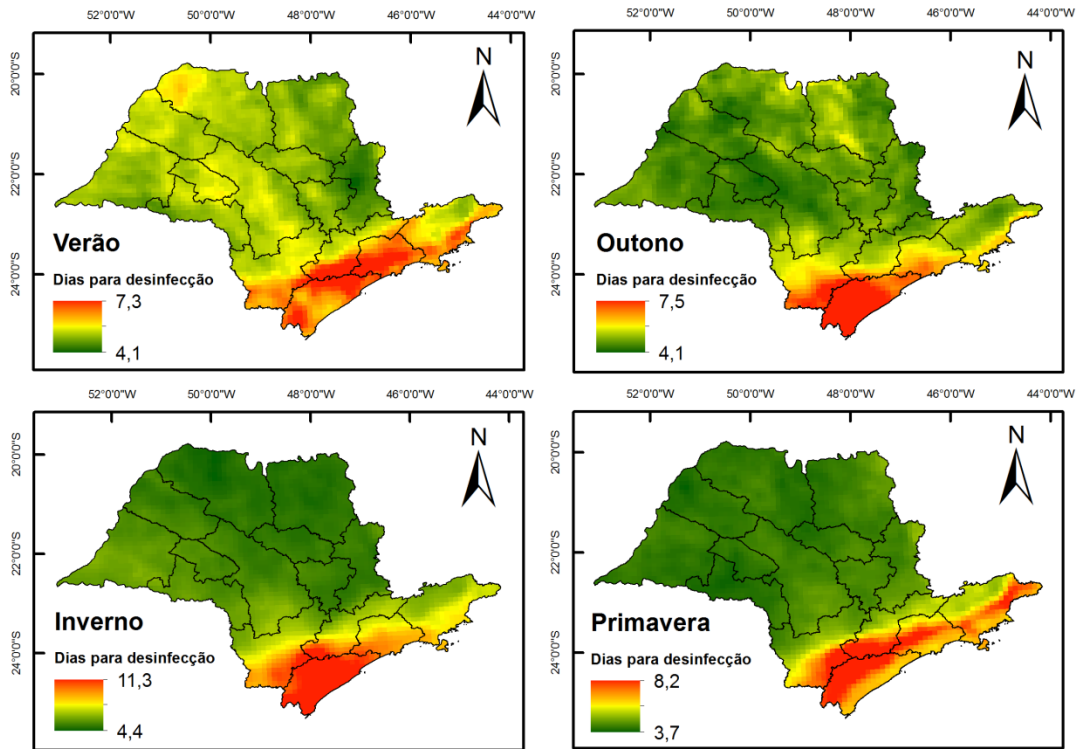


Figura 2: Tempo de exposição à radiação solar para reduzir uma população inicial de CF de 10^7 até 1000 NMP mL^{-1} em ARD com concentração de 100 mg L^{-1} de SST.

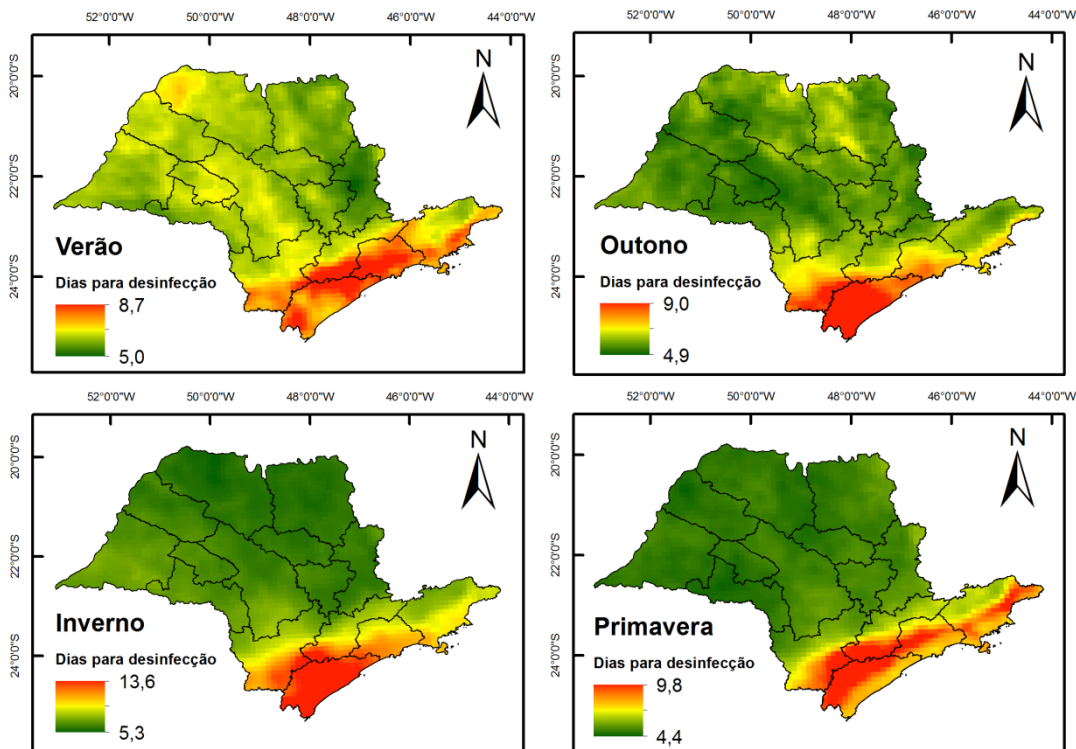


Figura 3: Tempo de exposição à radiação solar para reduzir uma população inicial de CF de 10^7 até 1000 NMP mL^{-1} em ARD com concentração de 200 mg L^{-1} de SST.

4. CONCLUSÃO

- A eficiência da tecnologia SODIS varia de acordo com as estações do ano, sendo que os melhores resultados são obtidos na primavera e os piores no inverno.
- Quanto menor a concentração de SST, maior o potencial de aplicação da SODIS no estado de São Paulo.

1. Queluz, JGT, Alves, TR, Sánchez-Román, RM. Desinfecção solar: uma solução de baixo custo para o tratamento de águas reduárias. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*. 2014; 8(3):199-208.
2. Acra A, Raffoul Z, Karahagopian Y. Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions: guidelines for household application in developing countries. Beirut: Unicef; 1984.
3. Wegelin M, Canonica S, Mechsner K, et al. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *J Water SRT – Aqua*. 1994; 43(3):154-169.
4. Ubomba-Jaswa E, Fernández-Ibáñez P, Navntoft C, Polo-López MI, McGuigan KG. Investigating the microbial inactivation efficiency of a 25 L batch solar disinfection (SODIS) reactor enhanced with a compound parabolic collector (CPC) for Household Use. *J Chem Technol Biotechnol*. 2010; 85(8):1028-1037.
5. Sánchez-Román RM, Soares AA, Matos AT, et al. Domestic wastewater disinfection using solar radiation for agricultural reuse. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(1):65-71.
6. Queluz, JGT, Sánchez-Román, RM. Efficiency of domestic wastewater solar disinfection in reactors with different colors. *Water Utility Journal*. 2014; 7(1):35-44.
7. Sánchez-Román RM, Soares AA, Sediya GC, Matos AT. Potential use of solar radiation to disinfect domestic wastewater in Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*. 2008; 81(3):283-294.
8. World Health Organization. *Wastewater Use in Agriculture*. Geneva: World Health Organization; 2006.
9. Von Sperling M, Chernicharo CAL. *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. London: Iwa Publishing; 2005.
10. OpenEI. Brazil direct normal solar radiation model (10km) from INPE and LABSOLAR. Disponível em: <http://en.openei.org/datasets/node/547>
11. Martins FR, Pereira EB, Abreu SL. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*. 2007; 81:517-528.
12. Martins FR, Pereira EB, Guarnieri RA, et al. Mapeamento dos recursos de energia solar no Brasil utilizando modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. *Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar*; 2007 Abr 8-10; Fortaleza, BR. Fortaleza: ABENS; 2007.
13. Pereira EB, Martins FR, Abreu SL, Rütther R. *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: INPE; 2006.
14. International Agency for Research on Cancer. *A Review of human carcinogens: radiation*. Lyon: IARC; 2012.
15. ArcGIS [programa de computador]. Versão 10.1. Redlands (CA): Environmental Systems Research Institute (ESRI); 2012.
16. Tomlin CD. *Geographic information system and cartographic modeling*. Englewood Cliffs: Prentice Hall; 1990.
17. USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. *Wastewater technology fact sheet: ultraviolet disinfection*. Washington: United States Environmental Protection Agency; 1999.
18. EAWAG/SANDEC. *SODIS Solar Water Disinfection: A guide for the application of SODIS*. Dubendorf: Swiss Federal Institute For Environmental Science And Technology; 2002.