

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS EM REATORES DE DIFERENTES
COLORAÇÕES**

JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP
Julho - 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS EM REATORES DE DIFERENTES
COLORAÇÕES**

JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP
Julho – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Q3e Queluz, João Gabriel Thomaz, 1985-
 Estudo da eficiência da desinfecção solar de águas res-
 duárias domésticas em reatores de diferentes colorações /
 João Gabriel Thomaz Queluz. - Botucatu : [s.n.], 2013
 x, 78 f. : ils. color., tabs., grafs., fots. color.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
 Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2013
 Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román
 Inclui bibliografia

 1. Águas residuais - Purificação. 2. Água - Reutiliza-
 ção. 3. Energia solar na agricultura. 4. Reator solar. I.
 Sánchez-Román, Rodrigo Máximo. II. Universidade Estadual
 Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).
 Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

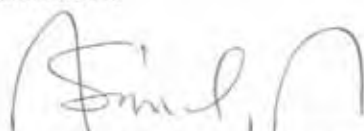
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS EM REATORES DE DIFERENTES
COLORAÇÕES”

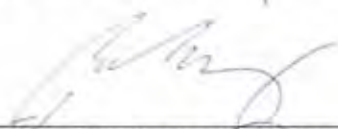
ALUNO: JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

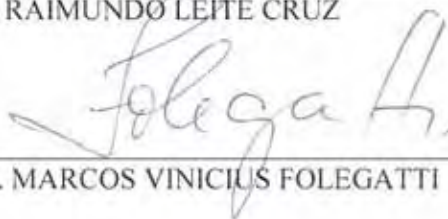
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

Data da Realização: 19 de julho de 2013.

OFEREÇO

À minha mãe, por seu apoio, suporte e amor.

AGRADEÇO

Ao meu pai, por todos os ensinamentos.

DEDICO

À Marina, minha noiva, por todo respeito e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, pela orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Matheus Yalenti Perosa, pelo apoio na construção do sistema estudado.

Ao Prof. Dr. João Francisco Escobedo e ao doutorando Enzo Dal Pai, pela cessão de dados meteorológicos.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Corrente e à Profa. Dra. Luzia Aparecida Trinca, pelo auxílio na análise estatística.

Aos colegas de pós-graduação, Francisca Franciana Sousa Pereira, Edilson Ramos Gomes e Ramilos Rodrigues Brito, pela prontidão e grande auxílio na execução do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudo.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 Reúso de águas residuárias na agricultura	8
2.1.1 Aspectos gerais	8
2.1.2 Riscos e benefícios da utilização de águas residuárias na agricultura	12
2.2 Processos de desinfecção de águas residuárias	14
2.3 Desinfecção solar.....	15
2.3.1 Mecanismos de ação	17
2.3.2 Eficiência da desinfecção solar	18
2.3.3 Experiências práticas.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 Local do experimento	24
3.2 Sistema de tratamento e desinfecção solar.....	25
3.3 Origem do afluente	27
3.4 Operação do sistema de desinfecção, coleta e análise de amostras	27
3.5 Determinação da radiação solar global, radiação UV e temperatura.....	30
3.6 Análise estatística	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Características do efluente	33

4.2	Alterações na qualidade do efluente	35
4.3	Variações na temperatura.....	40
4.4	Análise estatística	46
4.5	Simulação do modelo ajustado.....	59
5.	CONCLUSÕES	61
6.	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE 1	69
	APÊNDICE 2	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis estudadas na água residuária e métodos adotados para análise.....	30
Tabela 2 – Principais características operacionais dos sensores de radiação.....	31
Tabela 3 – Características do efluente do tanque séptico.....	33
Tabela 4 – Características do efluente durante a desinfecção solar.....	34
Tabela 5 – Temperatura do efluente nos três reatores.....	45
Tabela 6 - Estatística descritiva dos três modelos sigmóides ajustados.....	48
Tabela 7 – Análise de variância entre o modelo agrupado e os modelos individuais.....	49
Tabela 8 – Modelos ajustados com regressão linear e seus respectivos valores de AIC e BIC.....	53
Tabela 9 – Teste “t” para os parâmetros avaliados.....	54
Tabela 10 - Estatística descritiva do modelo linear ajustado.....	55
Tabela 11 – Estimativa do tempo necessário para a desinfecção de águas residuárias domésticas em Botucatu/SP para reúso na agricultura irrigada utilizando a equação (4).....	59
Tabela 12 – Dados originais.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atendimento urbano por rede coletora de água residuária no Brasil.....	11
Figura 2 - Volume de água residuária produzida, coletada e tratada por Região Hidrográfica.....	11
Figura 3 - Processos de desinfecção de águas residuárias.....	14
Figura 4 - Divisão do espectro eletromagnético.....	16
Figura 5 - Efeito da radiação UV sobre o material genético bacteriano.....	17
Figura 6 - Reator solar aperfeiçoado cheio com água de 100 NTU de turbidez.....	21
Figura 7 - Reator para desinfecção solar de águas residuárias domésticas.....	22
Figura 8 - Sistema de desinfecção solar.....	25
Figura 9 - Reator solar preto.....	26
Figura 10 - Carreta pipa abastecendo a caixa d'água com o afluente.....	27
Figura 11 - Disposição do efluente no reator de desinfecção solar.....	28
Figura 12 - Reatores de desinfecção solar com lâminas de 10 cm do efluente expostas à radiação solar.....	29
Figura 13 - A) Bolsa plástica estéril (WHIRL-PAK 100 ml / NASCO); B) Bolsa plástica estéril com amostras do efluente.....	30
Figura 14 - Termo-higrômetro.....	31
Figura 15 - Concentração de matéria orgânica nos três reatores durante a primeira e segunda repetição.....	36
Figura 16 - Concentração de matéria orgânica nos três reatores durante a terceira e quarta repetição.....	37

Figura 17 - Concentração de sólidos suspensos totais nos três reatores durante a primeira e segunda repetição.....	38
Figura 18 - Concentração de sólidos suspensos totais nos três reatores durante a terceira e quarta repetição.....	39
Figura 19 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a primeira repetição do experimento.....	41
Figura 20 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a segunda repetição do experimento.....	42
Figura 21 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a terceira repetição do experimento.....	43
Figura 22 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a quarta repetição do experimento.....	44
Figura 23 - População remanescente de coliformes fecais em relação à dose de radiação solar nos três reatores.....	46
Figura 24 - Modelos sigmóides ajustados por tratamento.....	47
Figura 25 - Comparação entre os modelos ajustados para cada tratamento.....	48
Figura 26 - Comparação entre o modelo agrupado ajustado e o modelo de Sánchez-Román et al. (2007).....	50
Figura 27 - Distribuição dos resíduos e normalidade do modelo agrupado ajustado.....	51
Figura 28 - Redução logarítmica de coliformes fecais em relação à dose de radiação solar.....	52
Figura 29 - Gráfico da população remanescente de <i>E. coli</i> após a água residuária doméstica ser expostas à componente UV da radiação solar para diferentes concentrações de sólidos suspensos totais, conforme a equação (4).....	56

Figura 30 - Gráfico de superfície da população remanescente de *E. coli* após a água residuária doméstica ser expostas à componente UV da radiação solar para diferentes concentrações de sólidos suspensos totais, conforme a equação (4).....57

Figura 31 - Distribuição dos resíduos e normalidade do modelo ajustado para equação(4).....58

RESUMO

A utilização de água residuária doméstica (ARD) na agricultura irrigada exige medidas de desinfecção para garantir padrões de qualidade e proteger a saúde humana dos patógenos presentes. Raios UV são eficientes para esta finalidade e há diversos relatos de sistemas de desinfecção solar (SODIS – *solar disinfection*), tanto para a desinfecção de água para consumo humano quanto para a desinfecção de ARD. Não há estudos sobre a eficiência da desinfecção de ARDs utilizando-se diferentes revestimentos nos reatores solares de concreto.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da desinfecção solar de ARD para reúso na agricultura em reatores solares com diferentes colorações: preta, branca e concreto.

A ARD, após passar pelo tanque séptico, era conduzida aos reatores, formando lâminas de água residuária com 10 cm de profundidade, que ficavam expostas à radiação solar durante três dias consecutivos. A eficiência da desinfecção foi avaliada pela concentração de coliformes fecais (CF), demanda química de oxigênio (DQO), temperatura do efluente, radiação global, radiação UV, pH e sólidos suspensos totais (SST). Os dados foram analisados utilizando-se análise de regressão propondo-se um modelo matemático que representa a inativação de patógenos.

O efluente do tanque séptico utilizado na desinfecção solar apresentou em média os seguintes padrões de qualidade: $1,29 \times 10^6$ NMP 100mL⁻¹ (Número mais provável a cada 100ml), 654,96 mgDQO L⁻¹, 180,33 mgSST L⁻¹ e 6,17 de pH. Durante o processo constataram-se melhorias nos padrões DQO e SST nos reatores.

Além disso, os resultados mostram que o efluente nos diferentes reatores apresentou temperaturas distintas: as maiores foram observadas no reator preto e as menores no reator branco, porém, estas diferenças foram pequenas - em média 2°C – não promovendo diferença na eficiência do tratamento entre os reatores.

A análise estatística comprovou que não existe diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre a eficiência do processo de SODIS nos reatores. Com os dados coletados foi desenvolvido um modelo matemático que representa a população remanescente de coliformes fecais em águas residuárias após serem expostas à determinada dose de radiação solar direta.

Os resultados permitem concluir que: 1) a coloração do reator não altera a eficiência do processo de SODIS; 2) as variáveis mais importantes do processo são a componente UV-A da radiação solar e a concentração de SST; 3) Para as condições climáticas do município de Botucatu/SP o tempo necessário para a desinfecção de ARD de $1,29 \times 10^6$ NMP 100 mL⁻¹ até 1.000 NMP 100 mL⁻¹ pode variar de 2,82 a 7,19 dias.

Palavras-chave: desinfecção solar, água residuária doméstica, reúso na agricultura

STUDY OF THE EFFICIENCY OF DOMESTIC WASTEWATER SOLAR DISINFECTION IN REACTORS WITH DIFFERENT COLORS. Botucatu, 2013. 78p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

Adviser: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

SUMMARY

The use of domestic wastewater (DWW) in irrigated agriculture requires disinfection measures to protect human health from pathogens. UV rays are effective for this purpose and there are many reports of solar disinfection (SODIS) systems, for both disinfection of drinking water and disinfection of DWW. The literature does not present any studies on the disinfection efficiency of DWW using different colors in concrete solar reactors.

The aim of this study was to evaluate the efficiency of DWW solar disinfection for agriculture reuse in solar reactors with different colors: black, white and concrete.

DWW, after passing through the septic tank was conducted to the reactors until the water depth reach 10 cm that was exposed to sunlight for three consecutive days. The disinfection efficiency was evaluated by the concentration of fecal coliforms (FC), chemical oxygen demand (COD), effluent temperature, global radiation, UV radiation, pH and total suspended solids (TSS). The data were analyzed using regression analysis and a mathematical model that represents the inactivation of pathogens was proposed.

The effluent from the septic tank used for solar disinfection had the following mean quality standards: 1.29×10^6 MPN 100mL^{-1} , 654.96 mgCOD L^{-1} , 180.33 mgSST L^{-1} and pH 6.17. During the process it was noticed improvement in COD as well as TSS concentration in the reactors.

Furthermore, the results show that the effluent in different reactors had distinct temperatures: the highest rates were observed in the black reactor and the

smallest in the white, however these differences were slight - on average 2°C – and they do not promote difference on treatment efficiency among reactors.

Statistical analysis did not show significant difference ($p \leq 0.05$) between the efficiency of SODIS in the reactors. The collected data allowed the development of a mathematical model that represents the remaining population of fecal coliforms in wastewater after being exposed to a certain dose of direct solar radiation.

The results support the following conclusions: 1) the reactor color does not alter the SODIS efficiency, 2) the process most important variables are the UV-A component of solar radiation and the TSS concentrations; 3) for DWW disinfection from 1.29×10^6 MPN 100mL⁻¹ to 1.000 MPN 100mL⁻¹ under the climatic conditions of Botucatu / SP, Brazil, the time required might range from 2.82 to 7.19 days.

Keywords: solar disinfection, domestic wastewater, agriculture reuse

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acentuado da população mundial tem tido como consequência o aumento na demanda pelos recursos hídricos tanto para abastecimento público quanto para a produção de alimentos. Também, o uso inadequado das águas e o lançamento de resíduos sem tratamento têm 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. Sobretudo, há ainda regiões nas quais a população não tem sequer acesso à água. Estes fatos indicam que os recursos hídricos estão sendo contaminados de maneira descontrolada e mostram a importância de se enveredar todos os esforços para a preservação dos recursos hídricos.

Nesse contexto, o reúso de águas residuárias na agricultura como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos permitiria a redução na demanda de água de melhor qualidade e a diminuição na poluição dos recursos hídricos. Atualmente, diversas cidades do mundo aproveitam as águas residuárias na agricultura. Entretanto, não há na literatura dados fidedignos nem sobre a extensão das áreas irrigadas com águas residuárias nem sobre o percentual dessas águas utilizadas na irrigação.

Algumas estimativas da Organização Mundial de Saúde (OMS) sugerem que a extensão das áreas irrigadas com águas residuárias no mundo corresponde a 7% do total das áreas irrigadas no mundo, o que equivale a, aproximadamente, 20 milhões de hectares (OMS, 2006). Também, existem poucos estudos que descrevem e quantificam a produção de alimentos devido à utilização de águas residuárias, mas estudos realizados

em cidades da África relatam que entre 50 a 90% dos vegetais consumidos são produzidos com irrigação com águas residuárias (DRECHSEL et al., 2006).

Entretanto, antes do uso indiscriminado das águas residuárias na agricultura deve-se considerar que as fezes humanas contêm microrganismos potencialmente danosos à saúde humana. Assim, o uso dos efluentes domésticos como fonte segura de abastecimento de água para a agricultura requer a adoção de medidas de desinfecção para a obtenção de padrões de qualidade adequados.

No entanto, a maioria dos métodos de desinfecção são processos dispendiosos, de difícil aplicabilidade em pequenas propriedades ou em comunidades de baixa renda sem infraestrutura para construir e manter o sistema. Para que países em desenvolvimento e/ou comunidades de baixa renda possam utilizar águas residuárias na agricultura sem riscos sanitários faz-se necessária à adoção de um sistema de desinfecção eficaz, com baixo custo de instalação, de fácil utilização e com poucos gastos de manutenção.

Uma alternativa bastante promissora para o preenchimento destas características é o processo de desinfecção solar (SODIS: *solar disinfection*), para o qual existem diversos modelos e maneiras de realização. De modo geral, o sistema é composto apenas por um recipiente que permite a exposição da água à radiação solar, podendo ser utilizadas garrafas PET, garrafas de vidro, reatores, caixas de concreto, etc.

A ação bactericida dos raios solares para desinfetar a água está comprovada. Estudos que avaliam o número médio de bactérias inativadas em diferentes amplitudes de onda de luz mostram que os maiores efeitos germicidas são observados na amplitude correspondente à dos raios UV (ACRA et al., 1984; WEGELIN et al., 1994).

Considerando que: (1) o reúso de águas residuárias na agricultura proporciona uma diminuição na demanda e na poluição dos recursos hídricos; (2) os efluentes sanitários apresentam patógenos que devem ser removidos através de processos de desinfecção antes do reúso dessas águas; (3) a maioria dos processos de desinfecção são de difícil aplicabilidade em comunidades rurais, pois são dispendiosos e muitas vezes necessitam de técnicos qualificados para operar o sistema; (4) os efeitos bactericidas da radiação solar são comprovados e podem ser aproveitados para desinfetar águas residuárias para posterior reúso na agricultura; (5) os sistemas de desinfecção de águas residuárias devem apresentar baixo custo de instalação e manutenção e devem ser de fácil utilização para que pequenas propriedades ou comunidades de baixa renda possam adotá-los.

Por estas razões, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema de desinfecção solar de águas residuárias domésticas e avaliar a eficiência do processo de desinfecção em três reatores solares com diferentes cores de revestimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Reúso de águas residuárias na agricultura

2.1.1 Aspectos gerais

A utilização de águas residuárias, de lodo e de fezes animais na agricultura é uma prática antiga realizada há milhares de anos em diversas regiões do planeta, inclusive em antigas civilizações da Ásia, da Europa e do Mediterrâneo (ANGELAKIS et al., 2005).

Nos últimos séculos, a prática da agricultura irrigada com água residuária foi comum em fazendas dos Estados Unidos e da Europa, mas com os acentuados avanços tecnológicos e econômicos e com o aumento das preocupações com a saúde e com o meio ambiente, ocorridos no século XX, os países desenvolvidos deixaram de utilizar águas residuárias na agricultura (ASANO et al., 2007).

Em contraste, devido a aspectos socioeconômicos e ambientais, o reúso de efluentes urbanos na agricultura tornou-se uma prática comum nos países em desenvolvimento. Estudos realizados por Jiménez (2006), pela OMS (2006) e por Raschid-Sally e Jayakody (2008) mostram que os principais fatores responsáveis pelo reúso de águas residuárias na agricultura irrigada nos países em desenvolvimento são:

- Ausência de tratamento adequado dos efluentes gerados nos centros urbanos. As cidades não tratam e/ou não conseguem tratar o grande volume de efluentes, o que leva à poluição das águas superficiais utilizadas na irrigação;
- Carência de fontes de água seguras;
- Pobreza e falta de educação;
- Aumento da população e da demanda por alimentos;
- Incentivo dos mercados para a produção de alimentos nas proximidades dos centros urbanos, locais onde os corpos d'água, geralmente, são poluídos;
- Percepção dos produtores sobre a composição e os valores nutricionais das águas residuárias.

Portanto, observa-se que o uso de águas residuárias em países em desenvolvimento é uma mistura de escassez de água, pobreza, educação, crescimento populacional, demanda por alimentos, interesses econômicos e pouca infraestrutura. Consequentemente, a falta de políticas públicas, de recursos financeiros e de infraestrutura, frequentes nestes países, induziram o reúso de águas residuárias descontrolado, sem nenhum planejamento e fiscalização.

Um fenômeno recente muito interessante tem sido observado nos países desenvolvidos, os quais estão retomando a prática de disposição de efluentes na agricultura, uma vez que o grande crescimento populacional das últimas décadas causou um aumento exagerado na demanda pelos recursos hídricos, seja para uso doméstico quanto para uso agrícola. Assim, a água que seria utilizada na irrigação está sendo destinada para outras necessidades, enquanto que a irrigação tem sido realizada com águas residuárias tratadas, reduzindo a escassez hídrica e a poluição dos corpos d'água desses países (JIMÉNEZ et al., 2010; PEDRERO et al., 2010).

O estudo de Jiménez et al. (2010) define quatro possíveis tipos de reúso para águas residuárias na agricultura:

1. Reúso direto: refere-se à utilização de águas residuárias sem tratamento para irrigação;
2. Reúso indireto: refere-se ao uso de água residuária diluída, ocorre à jusante do ponto de lançamento dos efluentes no corpo d'água;
3. Reúso de esgoto tratado: refere-se ao uso de águas residuárias que são tratadas e transportadas diretamente da estação de tratamento até o local onde será utilizada;

4. Reúso planejado: refere-se à utilização de normas e diretrizes para regulamentar as práticas de reúso de efluentes tratados, sem tratamento e/ou diluídos na agricultura.

O relatório sobre reúso de águas residuárias na agricultura realizado em 2010 pelo Banco Mundial (SCHEIERLING et al., 2010) associa os tipos de reúso de águas residuárias na agricultura e os problemas decorrentes dessa prática com o nível econômico de diferentes países. Em países de baixa renda, como por exemplo, Gana, onde as redes de coleta e os sistemas de tratamento de esgoto são precários e/ou inexistentes, o uso de água residuária na agricultura é comumente realizado de maneira direta e indireta e sem nenhum planejamento. Já nos países de renda média, como Chile e Jordânia, o uso direto e indireto de águas residuárias na irrigação ainda é observado, mas com a introdução de sistemas de tratamento nos centros urbanos o reúso direto de água residuária tratada está se tornando uma prática comum. Em alguns desses países de renda média já é possível observar-se o reúso planejado das águas residuárias na agricultura. Os países de alta renda, como Estados Unidos e Israel, para reverter o cenário de escassez hídrica e poluição dos corpos d'água, investiram em tecnologias de tratamento de águas residuárias e desenvolveram diretrizes para nortear e controlar as práticas de reúso. Desta maneira, o reúso de efluentes na agricultura destes últimos países é realizada com águas residuárias tratadas e de forma planejada.

Jiménez et al. (2010) afirmam que o uso de águas residuárias na agricultura irrigada é predominantemente indireto e que não ocorre exclusivamente em países de baixa renda, mas também em países de renda crescente, como o Brasil.

Corroborando esta afirmação, o relatório de conjuntura do ano de 2009 da Agência Nacional de Águas (ANA) mostra a carência de redes coletoras de águas residuárias no Brasil, o que indica a ausência de sistemas de tratamento, a disposição final inadequada das águas residuárias e, conseqüentemente, a poluição das águas superficiais. Estes dados podem ser observados na Figura 1 que mostra que as redes de coleta estão disponíveis principalmente em locais com grande concentração populacional, nos quais, obviamente, há maior geração de esgoto.



Figura 1 - Atendimento urbano por rede coletora de água residuária no Brasil (Fonte: ANA, 2009).

Entretanto, o mesmo relatório (ANA, 2009) evidencia que nem todo volume coletado é tratado, como observado na Figura 2.

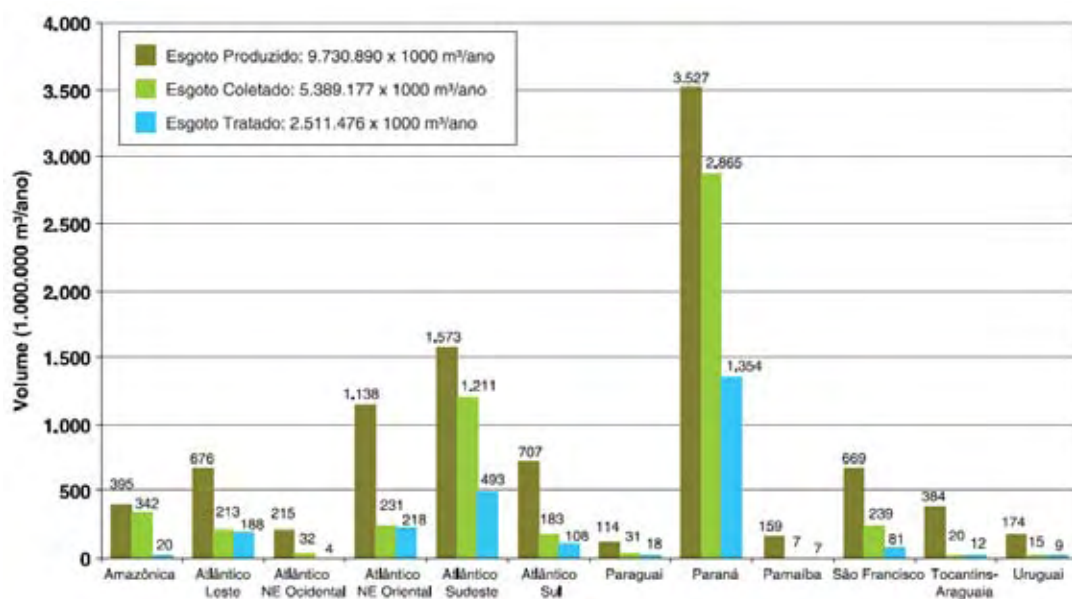


Figura 2 - Volume de água residuária produzida, coletada e tratada por Região Hidrográfica (Fonte: ANA, 2009).

Estes dados mostram que as relações entre produção e coleta e entre produção e tratamento são muito baixas, evidenciando que está ocorrendo a poluição dos corpos d'água, já que grande parte do volume de efluente gerado não é coletado e/ou não recebe tratamento adequado antes de ser disposto no ambiente.

Em resumo, no Brasil ainda é necessário um grande avanço na coleta e no tratamento das águas residuárias e também nas práticas e diretrizes para reúso destas águas na agricultura.

2.1.2 Riscos e benefícios da utilização de águas residuárias na agricultura

O uso de águas residuárias na agricultura irrigada pode causar impactos positivos e negativos conforme mostrado por vários autores em estudos realizados em diferentes regiões do planeta (IRÉNIKATCHÉ AKPONIKPÈ et al., 2011; MUYEN et al., 2011; ROJAS-VALENCIA et al., 2011; TIWARI et al., 2011).

O aspecto positivo de maior importância do reúso das águas residuárias na agricultura é que estas águas estão disponíveis durante todo o ano, uma vez que não dependem das precipitações pluviométricas e das estações do ano. Esse aspecto permite o aumento das áreas irrigadas, a produção anual de alimentos e a irrigação em locais que sofrem com falta de água, principalmente regiões com climas árido e semiárido (KERAITA et al., 2008).

Um estudo realizado por Carr et al. (2011), na Jordânia, constata que os produtores reconhecem como um benefício importante a disponibilidade contínua de águas residuárias urbanas, o que lhes permite a produção de alimentos durante todo ano, bem como os benefícios econômicos consequentes.

Outro aspecto benéfico é a composição destas águas, pois são extremamente ricas em nutrientes. Algumas estimativas sugerem que 1.000 m³ de águas residuárias urbanas podem fornecer para um hectare irrigado a quantidade de 4-24 kg de fósforo, 2-69 kg de potássio, 16-62 kg de nitrogênio, 27-182 kg de sódio, 18-208 kg de cálcio e de 9-110 kg de magnésio. Além disso, as águas residuárias podem fornecer diversos micronutrientes essenciais para o crescimento vegetal como o ferro, o manganês, o cobre e o zinco (QADIR et al., 2007).

Conforme Hespanhol (2008), a elevada concentração de nutrientes das águas residuárias permite que os produtores reduzam, ou até eliminem, a aplicação de

fertilizantes comerciais em suas culturas. Também, a matéria orgânica presente nos efluentes pode alterar a estrutura do solo, aumentando a capacidade de retenção de água.

Os resultados práticos obtidos na Índia com a utilização de águas residuárias na agricultura (SINGH et al., 2012) confirmam que estas águas não só fornecem os nutrientes essenciais às culturas, como também aumentam a disponibilidade de nutrientes e de micronutrientes e a concentração de matéria orgânica no solo. Este estudo indica, portanto, que o uso de efluentes na agricultura aumenta a fertilidade dos solos.

Em contraste, o excesso de nutrientes pode induzir ao crescimento vegetativo das culturas, à eutrofização de corpos d'água, ao crescimento das algas nos sistemas de irrigação e à contaminação das águas de subsuperfície (QADIR; SCOTT, 2010).

Além do eventual excesso de nutrientes, outros componentes das águas residuárias urbanas podem causar impactos negativos às culturas, ao ambiente e à saúde humana. Sais, metais pesados provenientes de indústrias, sólidos suspensos, compostos orgânicos, ácidos e bases podem causar salinização e poluição dos solos, danos aos sistemas de irrigação, crescimento vegetativo das culturas, alteração da mobilidade de metais no solo, poluição das águas subterrâneas, contaminação das culturas e danos à saúde dos consumidores e dos irrigantes (OMS, 2006).

O maior risco associado ao uso de águas residuárias na agricultura são os possíveis impactos à saúde pública devido à presença de patógenos nessas águas. As bactérias, vírus, protozoários e helmintos estão presentes nas águas residuárias e podem contaminar os solos e as culturas representando um risco à saúde tanto dos trabalhadores como a dos consumidores de alimentos produzidos nas áreas irrigadas com águas residuárias (SCHEIERLING et al., 2010).

Segundo a OMS (2006), os maiores riscos de contaminação por patógenos estão relacionados ao consumo de alimentos crus. Além disso, alguns desses microrganismos sobrevivem por longos períodos de tempo no solo e nas culturas, e também podem sobreviver tanto ao transporte quanto à estocagem dos alimentos. Duarte (2006) mostrou que pimentões irrigados por gotejamento com água residuária tratada são menos contaminados do que os frutos comercializados.

Assim, antes do uso indiscriminado de águas residuárias na agricultura irrigada é necessário adotar-se sistemas de desinfecção destas águas que

garantam padrões de qualidade para a proteção da saúde humana, da saúde animal e também do meio ambiente.

2.2 Processos de desinfecção de águas residuárias

O objetivo da desinfecção de águas residuárias não é a eliminação total dos microrganismos, mas sim a diminuição da concentração de patógenos até níveis de qualidade necessários para diferentes usos do efluente (GONÇALVES et al., 2003a).

A desinfecção das águas residuárias pode ser realizada utilizando-se métodos químicos, biológicos, físicos e/ou fotoquímicos (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003; ACHER et al., 1997; ROJKO, 2003; VON SPERLING et al., 2003). Segundo Gonçalves et al. (2003a) os processos de desinfecção podem ser divididos em artificiais ou naturais, os quais de forma combinada ou isolada utilizam agentes químicos, físicos e biológicos para inativar microrganismos patogênicos.

Na Figura 3 são mostrados os principais processos de desinfecção de águas residuárias.

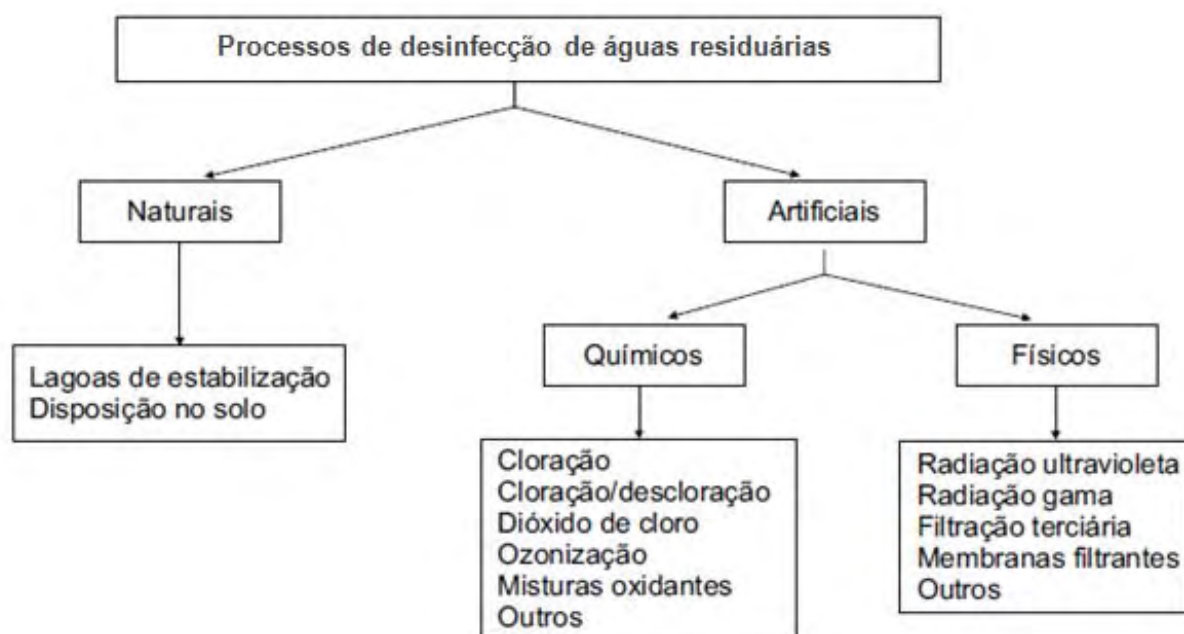


Figura 3 - Processos de desinfecção de águas residuárias (Fonte: Adaptado de GONÇALVES et al., 2003a).

A principal forma de desinfecção realizada nas estações de tratamento em todo o mundo, inclusive no Brasil, é a cloração (AISSE et al., 2003). Processo de desinfecção química que utiliza cloro, mas que apresenta significativas desvantagens, uma vez que o cloro pode reagir com material orgânico formando compostos cancerígenos e, também, porque existem microrganismos resistentes a esse tratamento (PONTIS, 1990; REGLI, 1992).

Os métodos físicos baseiam-se na retenção mecânica dos microrganismos por filtragem ou pelo aquecimento do líquido. A desinfecção fotoquímica tem efeito bactericida quando os fótons de luz são absorvidos pelos fotosintetizadores, passando a um estado de excitação elétrica e reagindo com moléculas de oxigênio, produzindo espécies reativas do oxigênio que causam ruptura das pontes de hidrogênio do material genético das bactérias (KEHOE et al., 2001).

No entanto, a maioria dos métodos de desinfecção são processos dispendiosos e que muitas vezes necessitam de mão de obra especializada, ou seja, são de difícil aplicabilidade em pequenas propriedades e em comunidades de baixa renda sem infraestrutura para construir e manter o sistema operante. Para que países em desenvolvimento e/ou comunidades rurais de baixa renda possam utilizar águas residuárias na agricultura com poucos riscos sanitários faz-se necessário à adoção de um sistema de desinfecção eficaz, com baixo custo de instalação, que não precise de produtos químicos ou energia elétrica, de infraestrutura simples, de fácil utilização e com manutenção pouco dispendiosa.

Uma alternativa bastante promissora para o preenchimento destas características é o processo de desinfecção solar (SODIS: *solar disinfection*), uma vez que a radiação solar é uma fonte de energia limpa e renovável, que não gera subprodutos tóxicos e está disponível a todos.

2.3 Desinfecção solar

O primeiro trabalho que constatou o efeito da luz sobre bactérias e outros organismos foi realizado no final do século XIX por Downes e Blunt (1877), que relataram os efeitos inibidores da radiação solar sobre o crescimento bacteriano.

Porém, foi somente no final do século XX, em Beirute, que a tecnologia SODIS foi estudada e desenvolvida como uma solução extremamente barata

para a desinfecção de água para consumo humano (ACRA et al., 1984). Os resultados obtidos mostraram que é possível diminuir em três logaritmos (log) a concentração de *E. coli* com apenas 75 minutos de exposição à radiação solar e que os maiores efeitos germicidas são observados na amplitude de onda correspondente à dos raios UV.

Segundo Oates (2001) o sol emite energia na forma de radiação eletromagnética e a tecnologia SODIS utiliza a energia de diferentes bandas do espectro eletromagnético para destruir os patógenos. Na Figura 4 é possível observar a divisão do espectro eletromagnético.



Figura 4 - Divisão do espectro eletromagnético (Fonte: Adaptado de RYER, 1998).

No espectro eletromagnético, a radiação UV está localizada entre os raios-X e a luz visível, com comprimento de onda variando entre 100 a 400nm, sendo dividida em quatro faixas de onda: UV-Vácuo (100 a 200nm), UV-C (200 a 280nm), UV-B (280 a 315nm) e UV-A (315 a 400nm) (USEPA, 2003).

Para os humanos, a UV-B é a radiação mais perigosa, pois é a principal responsável pela ocorrência de câncer de pele e é parcialmente absorvida na atmosfera (RYER, 1998). Entretanto, para os microrganismos a radiação UV-C é a mais letal, porque é na faixa de onda de 260nm que ocorre a absorção máxima de radiação por seu material genético (USEPA, 2003).

A camada de ozônio na atmosfera terrestre absorve grande parte da radiação UV-C e UV-B, permitindo que apenas a radiação UV-A atinja a superfície em quantidades significativas (EAWAG/SANDEC, 2002). Portanto, o efeito bactericida da

radiação solar está associado principalmente à radiação UV-A (315 a 400nm), como demonstrado nos trabalhos de Acra et al. (1984) e Wegelin et al. (1994).

2.3.1 Mecanismos de ação

A inativação dos microrganismos por radiação UV é provocada, principalmente, pelos danos causados ao material genético (DNA/RNA), o qual é formado por bases nitrogenadas unidas por pontes de hidrogênio (HIJNEN et al., 2006). A energia incidente lesa o DNA rompendo as pontes de hidrogênio e causando dimerização das bases nitrogenadas pirimídicas de um mesmo filamento de cromossomo. Estas alterações resultam na perda da função biológica, inclusive na capacidade de se reproduzir (VON SONNTAG et al., 2004). Nesta situação, os microrganismos que, eventualmente, conseguirem se duplicar serão mutantes incapazes de se reproduzirem (WEF, 1996).

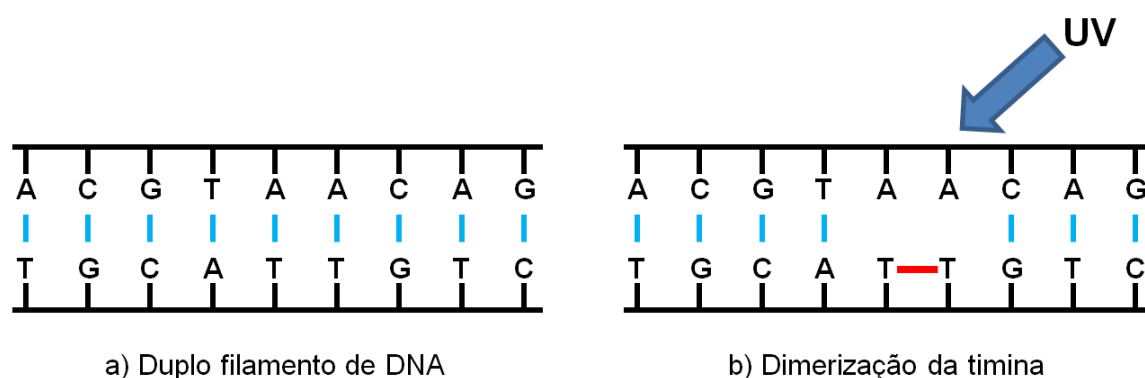


Figura 5 - Efeito da radiação UV sobre o material genético bacteriano (Fonte: Adaptado de GONÇALVES et al., 2003b).

Entretanto, há dois mecanismos naturais que permitem a recuperação do DNA dos microrganismos lesados por radiação solar: o primeiro na presença de luz e o segundo na sua ausência (HIJNEN et al., 2006). Na reativação na presença de luz, denominada fotorreativação, ocorre monomerização dos dímeros pela ação de enzimas que se ativam com a incidência de radiação com comprimento de onda entre 310 a 480nm (TOSA; HIRATA, 1999; OGUMA, et al., 2001). O processo de reativação que ocorre na ausência de luz, denominado de recuperação no escuro, remove a

sequência danificada do material genético e faz uma nova síntese do DNA (JUNGFER et al., 2007).

Obviamente, estes mecanismos de reativação afetam negativamente o processo de desinfecção UV e devem ser considerados para avaliação correta da eficiência da desinfecção (CHERNICHARO, et al., 2001). Uma maneira de minimizar-se os efeitos da reativação é o aumento da dose de radiação UV, para que os danos no DNA sejam intensificados e minimize-se a possibilidade de reparação de todos os danos sofridos pelo material genético (GONÇALVES et al., 2003b).

Outro mecanismo de inativação de patógenos causado pela radiação UV é a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS: reactive oxygen species). Segundo Fisher et al. (2008), a radiação UV induz a formação de superóxidos (O_2^-), peróxidos de hidrogênio (H_2O_2) e radicais hidroxilas ($OH^\cdot$). Os ROS conseguem oxidar ácidos nucleicos, enzimas e lipídeos dos microrganismos, causando perda da função biológica e consequente morte celular (MONCAYO-LASSO et al., 2009).

Reed (1997) avaliou a eficiência da desinfecção solar em condições aeróbias e anaeróbias e mostrou que a eficiência da desinfecção solar na inativação de bactérias é maior em condições aeróbias e que a presença inicial de altas concentrações de oxigênio dissolvido facilita a formação de formas reativas de oxigênio que consequentemente, aceleram o processo de inativação microbiologia através da radiação solar.

2.3.2 Eficiência da desinfecção solar

Diversas variáveis, tais como sólidos suspensos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), dureza, pH, temperatura, variações sazonais de incidência luminosa e tipo de microrganismo, podem alterar a eficiência do processo de desinfecção UV (WEGELIN et al., 1994; JOYCE et al., 1996; SOLARTE et al., 1997; KEHOE et al., 2001; BURGESS et al., 2002).

Os SST alteram a eficiência do processo porque protegem os microrganismos, uma vez que impedem a penetração e absorvem a radiação incidente. Também, a DBO quando composta de grande quantidade de matéria húmica, pode reduzir a eficiência do processo, pois materiais húmicos têm elevada absorbância de raios UV. A

dureza e o pH afetam a solubilidade de metais que podem absorver a radiação UV (USEPA, 1999).

A temperatura altera a configuração do DNA e a atividade das enzimas reparadoras (USEPA, 2003). Segundo Malato et al. (2009) temperaturas entre 20 e 40°C não afetam a inativação de bactérias por radiação UV, mas temperaturas iguais ou superiores à 45°C atuam em sinergismo com a radiação e aceleram o processo de desinfecção solar.

A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre sofre variações sazonais. A intensidade dessas variações depende diretamente da latitude local e é responsável pelas características do clima local. Portanto, as mudanças na intensidade de incidência de radiação solar afetam diretamente a eficiência da desinfecção solar e deve ser considerada antes da utilização da tecnologia SODIS. Além disso, a radiação solar também está sujeita as alterações diárias de incidência devido às condições de nebulosidade (EAWAG/SANDEC, 2002).

Finalmente, outra variável importante é o tipo de microrganismo presente no efluente, pois a desinfecção UV é muito eficiente na remoção de bactérias, vírus, mas os cistos de protozoários e ovos de helmintos têm mecanismos de defesa natural que os tornam resistentes à radiação UV (GONÇALVES et al., 2003b, KEHOE et al., 2004; HEASELGRAVE et al., 2006; BOYLE, 2008; HEASELGRAVE; KILVINGTON, 2011).

2.3.3 Experiências práticas

De acordo com Meierhofer e Landolt (2009) a tecnologia SODIS já é utilizada para a desinfecção de água para consumo por mais de dois milhões de pessoas em 33 países e os resultados obtidos pela adoção da SODIS nesses países mostram que é possível reduzir drasticamente a ocorrência de casos de diarreia. Os mesmo autores estimaram que a razão entre custo-benefício da adoção desse sistema pode chegar até 1:49, ou seja, para cada dólar investido na SODIS (compra ou troca dos recipientes) é possível economizar 49 dólares no setor da saúde.

O estudo de Sciacca et al. (2010) avaliou a eficiência da desinfecção solar em garrafas PET com e sem a adição de peróxido de hidrogênio utilizando como indicadores dois grupos de bactérias: Coliformes totais e *Salmonella* sp.

Os autores também avaliaram o recrescimento bacteriano nas 72 horas seguintes ao processo de desinfecção. Nas garrafas que foram expostas à radiação sem a adição de H₂O₂ as populações de Coliformes totais e *Salmonella* sp. foram inativadas respectivamente em três e quatro horas de tempo de exposição. Porém, as populações de *Salmonella* sp. apresentaram recrescimento nas horas seguintes ao tratamento. Nas amostras com a adição de H₂O₂ as populações bacterianas tanto de Coliformes totais quanto de *Salmonella* sp. foram inativadas em 30 minutos e não apresentaram recrescimento nas 72 horas seguintes.

O uso de diferentes sacolas plásticas de polietileno de baixa densidade como reatores para desinfecção solar foi avaliado por Dunlop et al. (2011) em condições laboratoriais. O material contido em sacolas inteiramente transparentes apresentou 7 log de inativação de *E. coli* com 150 minutos de tratamento, enquanto que o das sacolas com fundo preto, com fundo refletivo e com fundo composto (preto e refletivo) só foi necessário 120 minutos de exposição para atingir 7 log de inativação de *E. coli*. No tratamento com a sacola transparente a temperatura começou em 25°C e terminou com 45°C, já na sacola com fundo preto a temperatura de 45°C foi atingida com 60 minutos de tratamento e chegou a aproximadamente 50°C no final dos 120 minutos de exposição. No mesmo experimento os autores compararam eficiência do uso das sacolas transparentes com uso de garrafas PET para a SODIS em condições de campo. Em 240 minutos o conteúdo da sacola apresentou inativação de 6,5 log enquanto que o das garrafas apresentaram 3,5 log de inativação de *E. coli*. Estes achados estão diretamente associados com a maior área de exposição e com a menor lâmina que as sacolas apresentam em relação às garrafas PET.

Tendo em vista que o uso de garrafas e bolsas para a desinfecção solar só permite que pequenos volumes sejam tratados (≤ 3 litros), Ubomba-Jaswa et al. (2010) desenvolveram um reator solar aperfeiçoado com capacidade de 25 L (Figura 6). Os autores desenvolveram o reator com base nos seguintes princípios: uso de material de baixo custo, deveria ser resistente e apresentar gastos inexpressivos com manutenção. Os resultados obtidos com o uso desse reator foram promissores e mostraram que em dias ensolarados é possível remover completamente as populações de *E. coli* com apenas 5 horas de exposição à radiação solar e, quando a temperatura da água excedeu 45°C, foi possível inativar completamente as bactérias em águas com elevada turbidez (100 NTU) com 7 horas de exposição ao sol.



Figura 6 - Reator solar aperfeiçoado cheio com água de 100 NTU de turbidez (Fonte: UBOMBA-JASWA et al., 2010).

De acordo com Sánchez-Román et al. (2007), as limitações dos estudos realizados sobre o uso da radiação UV para a desinfecção de águas residuárias domésticas por famílias de baixa renda nos países em desenvolvimento incluem: (1) o processo necessita de lâmpadas ou de estruturas complexas para serem construídas e mantidas; (2) a maioria dos trabalhos é realizado com enfoque em água para consumo humano e não em água para irrigação; (3) a maioria dos sistemas desenvolvidos necessita de energia elétrica, que pode ser indisponível em áreas rurais.

Com base nesses argumentos, Sánchez-Román et al. (2007) desenvolveram um reator para desinfecção solar de águas residuárias domésticas (Figura 7) com formato quadrado de 1,5 metros de lado e 0,4 metros de profundidade, mostrando que a SODIS pode ser utilizada para desinfetar águas residuárias domésticas até níveis adequados para o reúso na agricultura e que o reator solar é recomendado para profundidades de até 0,20 metros. Os mesmos autores propõem um modelo matemático para determinar a população remanescente de microrganismos em águas residuárias de origem doméstica após serem expostas à radiação solar direta:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\exp(1,047 - 0,321F + 6,304d)}{(1 + \exp(1,047 - 0,321F + 6,304d))} \quad (1)$$

Em que N é a população de *E. coli* presente após as águas residuárias domésticas serem expostas à radiação solar (NMP/100 mL); N_0 a população de *E. coli* presente antes das águas residuárias domésticas serem expostas à radiação solar (NMP/100 mL); F é a fluência (dose) recebida pela água residuária (MJ m^{-2}); e d é a profundidade das águas residuárias domésticas no reator solar (m).



Figura 7 - Reator para desinfecção solar de águas residuárias domésticas (Fonte: SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2007).

Utilizando a equação (1) descrita acima e dados meteorológicos, Sánchez-Román et al. (2008) desenvolveram mapas que apresentam o tempo de exposição à radiação solar necessário, em qualquer lugar do Brasil, para reduzir a população de coliformes fecais (CF) de águas residuárias domésticas de $3,5 \times 10^6$ NMP 100 mL⁻¹ até 1.000 NMP 100 mL⁻¹. Com esses dados é possível observar-se que, no Estado de São Paulo, o tempo de exposição à radiação solar necessário para reduzir a população de coliformes para concentrações de 1.000 NMP 100 mL⁻¹ em lâminas com 20 cm de profundidade pode variar de um até três dias ao longo de um ano.

Uma eventual limitação do sistema desenvolvido por Sánchez-Román et al. (2007) é a forma estrutural do reator, com paredes verticais que formavam um ângulo de 90° com o fundo do reator, pois dependendo do ângulo de incidência dos raios solares ocorria a formação de sombras dentro do reator, diminuindo a área de exposição da ARD e, conseqüentemente a eficiência do processo de desinfecção solar. Uma solução para este problema seria a utilização de reator com paredes inclinadas, de modo a impedir a formação de sombras. Também, a utilização de diferentes cores no acabamento poderia aumentar a eficiência da desinfecção solar devido ao sinergismo entre a temperatura e a radiação UV.

Portanto, estudos sobre variações de formato e de diferentes revestimentos de reatores de SODIS podem contribuir para a melhoria da eficiência dos sistemas e ampliar sua utilização no País.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foi desenvolvido um sistema de tratamento e de desinfecção de águas residuárias domésticas composto por um tanque séptico e três reatores de desinfecção solar. Sua eficiência para reúso na agricultura irrigada foi avaliada utilizando-se os padrões de qualidade recomendados para o uso de águas residuárias domésticas tratadas na irrigação definidos pela OMS (2006): $\leq 1000 \text{ CF } 100 \text{ mL}^{-1}$. O experimento foi realizado de 25/03/2013 a 25/04/2013.

3.1 Local do experimento

O sistema de tratamento e desinfecção foi instalado no Sítio Modelo da Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP, Botucatu, SP, nas coordenadas geográficas 22° 51' 12" Sul e 48° 25' 45" Oeste e altitude de 763 metros acima do nível do mar.

Segundo Cunha et al. (2006) o clima da região é definido como Cwa (Koppén): clima temperado quente (mesotérmico) com verão chuvoso e inverno seco, a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. A precipitação média anual e temperatura média anual são respectivamente, 1508,8 mm e 21°C.

3.2 Sistema de tratamento e desinfecção solar

O sistema de tratamento e de desinfecção de águas residuárias domésticas desenvolvido é composto por um tanque séptico e três reatores de desinfecção solar. A utilização de tanque séptico teve como principal objetivo obter um efluente com menor concentração de sólidos em suspensão. Essa unidade de tratamento primário de água residuária doméstica retém a parte sólida e inicia o processo biológico de purificação da parte líquida do efluente, com um tempo de detenção hidráulica de 24 horas.

O sistema de desinfecção solar (Figura 8) é composto por três reatores ao nível do solo e à base de concreto. Os reatores têm a forma de tronco cônico invertido e dimensões idênticas, isto é raio maior, raio menor e altura de, respectivamente, 1,00 metros, 0,25 metros e 0,30 metros (Figura 9). Essas dimensões implicam em um ângulo de inclinação de $21,8^\circ$ na parede da estrutura.



Figura 8 – Sistema de desinfecção solar.



Figura 9 - Reator solar preto.

Essa forma estrutural dos reatores foi adotada para garantir que as paredes dos reatores não permitam a formação de sombras no efluente durante o maior tempo possível.

Para avaliar a relação entre a eficiência da desinfecção solar e o sinergismo entre temperatura e reflexão cada reator recebeu um diferente tipo de acabamento.

- Reator 1: O primeiro reator de desinfecção solar não recebeu nenhum tipo de acabamento específico. Neste reator, a água residuária foi tratada em contato direto com o concreto da estrutura do reator.
- Reator 2: O segundo reator recebeu uma cobertura de tinta plástica impermeável branca, com o objetivo de aumentar a reflexão dos raios UV dentro do reator.
- Reator 3: O último recebeu uma cobertura de tinta plástica impermeável preta, com o intuito de aumentar a retenção de calor nas paredes do reator e, consequentemente, aumentar a temperatura da água residuária sendo tratada.

3.3 Origem do afluente

O afluente utilizado era proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto de Botucatu e transportado por carro pipa até área experimental, esse efluente era armazenado em caixa d'água de 1.000 litros (Figura 10).



Figura 10 – Carreta pipa abastecendo a caixa d'água com o afluente.

3.4 Operação do sistema de desinfecção, coleta e análise de amostras

Para a realização do trabalho foram utilizados dois esquemas de coleta de dados:

- 1) *Tempo de exposição longo*, para avaliar o comportamento da população de coliformes fecais (CF) exposta a doses elevadas de radiação solar. O afluente, após passar pelo tanque séptico, foi conduzido aos reatores, nos quais formava uma lâmina de água residuária com 10 cm de profundidade, que ficava exposta à radiação solar durante três dias consecutivos. No primeiro dia, a primeira coleta de

amostras foi realizada às 8:00 h, logo após a lâmina de 10 cm de efluente doméstico ser disposta nos reatores e as coletas subsequentes foram realizadas a cada cinco horas até as 18:00 h. Nos outros dois dias subsequentes, as coletas foram realizadas a cada cinco horas no período das 8:00 às 18:00 h. Este procedimento, em batelada, foi realizado seis vezes em cada um dos reatores.

- 2) *Tempo de exposição curto*, para avaliar o comportamento inicial da população de coliformes fecais, e assim, determinar a extensão do “ombro” da curva de inativação. O efluente do tanque séptico era conduzido aos reatores, nos quais formava uma lâmina de água residuária com 10 cm de profundidade, que ficava exposta a radiação solar durante quatro horas. Este esquema foi repetido seis vezes e as amostras eram coletadas a cada hora.

Na Figura 11 é mostrado o efluente do tanque séptico sendo disposto em um dos reatores e na Figura 12 são mostrados os três reatores com as respectivas lâminas de 10 cm do efluente expostas à radiação solar.



Figura 11 – Disposição do efluente no reator de desinfecção solar.



Figura 12 – Reatores de desinfecção solar com lâminas de 10 cm do efluente expostas à radiação solar.

As amostras foram coletadas conforme os métodos recomendados pelo Standard Methods 1060B (APHA, 2005) e preservadas de acordo com os métodos definidos pelo Standard Methods 1060C (APHA, 2005). A cada coleta foram retiradas dos reatores três alíquotas: a primeira para análise da concentração de coliformes fecais (*E. coli*), a segunda para pH e demanda química de oxigênio (DQO) e a terceira para SST. Todas as alíquotas para a análise de coliformes fecais foram coletadas utilizando-se bolsas plásticas estéreis com capacidade para 100 ml da marca NASCO (Figura 13).

As análises físico-químicas e biológicas das amostras foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP conforme os métodos definidos pela APHA (2005). As análises de SST foram realizadas utilizando-se membranas com porosidade de 0,45 μm (Marca: Millipore).

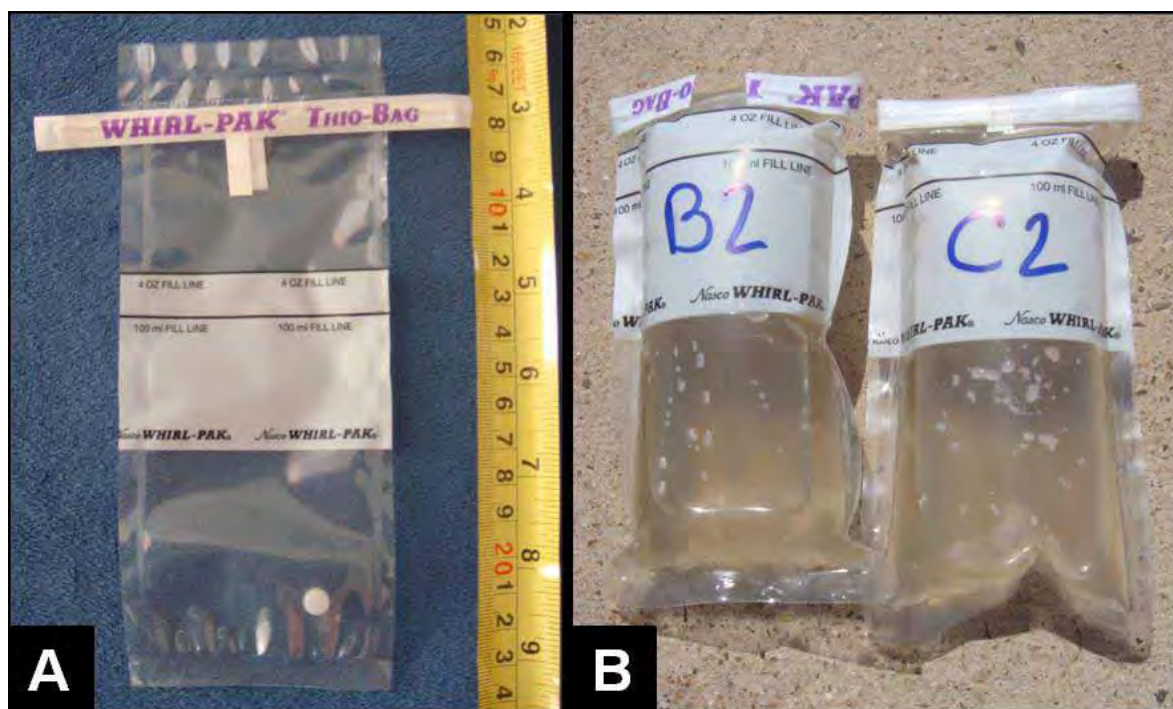


Figura 13 – A) Bolsa plástica estéril (WHIRL-PAK 100 ml / NASCO); B) Bolsa plástica com amostras do efluente.

Na Tabela 1 estão apresentadas as variáveis avaliadas, a denominação dos métodos adotados e suas respectivas referências.

Tabela 1 – Variáveis estudadas na água residuária e métodos adotados para análise

Variável	Método	Referência
Echerichia coli	Enzyme Substrate Test	SM 9223B
DQO	Closed Reflux, Colorimetric Method	SM 5220D
SST	Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	SM 2540D
pH	Eletrometric Method	SM 4500B

SM - Standard Methods (APHA, 2005).

3.5 Determinação da radiação solar global, radiação UV e temperatura

Os dados de radiação solar global e radiação UV incidentes em cada reator foram obtidos na estação meteorológica do Departamento de Recursos

Ambientais e Ciências do Solo. As principais características dos sensores de radiação utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais características operacionais dos sensores de radiação

Sensores de Radiação		
Tipo	Global	Ultravioleta
Marca	Eppley	Kipp & Zonen
Fator de Calibração	$\pm 6,97 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$211 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Alcance Espectral	305-2800nm	290-400nm
Tempo de Resposta	2s	5ms
Linearidade	$\pm 1\%$	$< 1\%$
Cosseno	$\pm 5\%$	$< \pm 10\%$
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	$< \pm 0,1\text{K}$

A temperatura foi determinada utilizando-se um termo-higrômetro (Figura 14) da marca Incoterm (Modelo: 7666.02.0.00) com leituras na faixa de -50 a $\sim 70^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figura 14 – Termo-higrômetro.

3.6 Análise estatística

A avaliação da eficiência na redução das concentrações de *E. coli* em cada reator solar foi determinada pelo estudo das variáveis dose de radiação global acumulada (MJ m^{-2}), dose de radiação UV acumulada (MJ m^{-2}), fração de radiação UV presente na radiação global, temperatura do efluente ($^{\circ}\text{C}$), DQO (mg L^{-1}), SST (mg L^{-1}) e pH.

Os dados foram avaliados utilizando-se análise de regressão no software estatístico R (versão 3.0.1). Para se comparar a eficiência dos tratamentos e as repetições do experimento a variável resposta utilizada foi a razão entre a população inicial (N_0) e a população remanescente (N) de CF após exposição à radiação solar ($y = N/N_0$). Desta forma, os valores da variável dependente serão sempre menores ou iguais a um e sempre maiores que zero.

Com base nos resultados obtidos por Sánchez-Román et al. (2007) a função utilizada para analisar os dados e ajustar os modelos foi uma função logística com dois parâmetros (S-shape function) ou função sigmoide. A forma geral dessa equação esta descrita na equação (2):

$$y = \frac{e^{(a+b_0x_0+b_1x_1+\dots+b_nx_n)}}{(1 + e^{(a+b_0x_0+b_1x_1+\dots+b_nx_n)})} \quad (2)$$

A função logística pode ser utilizada em análises de sobrevivência e em estudos de dose-resposta de microrganismos expostos à radiação UV (Kowalski et al., 2000).

Posteriormente, utilizando modelos lineares e adotando como variável resposta a redução logarítmica da população de coliformes fecais ($\text{LOG reduzido} = \log(1 / y)$) foram ajustados e comparados 12 modelos matemáticos. Os parâmetros adotados para a comparação entre modelos foram o AIC (Akaike Information Criterion) e BIC (Bayesian Information Criterion). Esses parâmetros podem ser utilizados para comparar modelos da mesma maneira que análise de variância e o modelo com os menores valores para esses dois parâmetros é o que melhor explica o conjunto de dados em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas seis repetições de coletas de dados conforme descrito na seção Material e Métodos. Entretanto, enquanto quatro baterias foram completadas, duas foram interrompidas pela ocorrência de chuva intensa durante a realização do experimento. Desta maneira, os dados das baterias incompletas não farão parte da discussão geral, porém, foram utilizados na análise estática para aperfeiçoar o ajuste dos modelos.

4.1 Características do efluente

Na Tabela 3 são mostrados os padrões avaliados do efluente utilizado no processo de desinfecção solar.

Tabela 3 – Características do efluente do tanque séptico

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
<i>E. coli</i> (NMP 100 ml ⁻¹)	1,29 x 10 ⁶	4,61 x 10 ⁶	1,32 x 10 ⁵	1,04 x 10 ⁶
DQO (mg L ⁻¹)	654,96	850,00	468,00	113,24
SST (mg L ⁻¹)	180,33	219,00	146,00	20,33
Temperatura (°C)	22,50	25,30	20,50	1,54
pH	6,17	6,71	5,93	0,19

As concentrações típicas para efluente de tanque séptico são descritas por von Sperling e Chernicharo (2005). Segundo estes autores as faixas de concentrações de DQO, SST e coliformes fecais, são respectivamente, 400-450 mg L⁻¹, 100-150 mg L⁻¹ e 10⁷-10⁸ CF 100 mL⁻¹. A comparação entre esses dados com os valores médios obtidos no presente trabalho evidencia que o efluente utilizado apresenta característica físico-química inferior à esperada. Com base nos dados fornecidos por Tchobanoglous (1979) o efluente do experimento pode ser classificado como de concentração média.

Além das alterações nas concentrações do indicador microbiológico utilizado, foram observadas as alterações nos padrões físico-químicos do efluente nos três reatores durante o processo de desinfecção. Na Tabela 4 estão descritos os valores obtidos nos três reatores durante o tratamento SODIS.

Tabela 4 – Características do efluente durante a desinfecção solar

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
REATOR CONTROLE				
DQO (mg L ⁻¹)	475,05	822,00	233,00	155,33
SST (mg L ⁻¹)	136,92	206,00	74,00	38,25
Temperatura (°C)	24,86	34,60	15,40	4,29
pH	7,18	7,99	5,93	0,63
REATOR BRANCO				
DQO (mg L ⁻¹)	494,02	839,00	275,00	145,85
SST (mg L ⁻¹)	131,30	204,00	95,00	32,43
Temperatura (°C)	23,51	31,50	13,90	4,13
pH	7,07	8,15	6,03	0,59
REATOR PRETO				
DQO (mg L ⁻¹)	492,25	850,00	259,00	160,59
SST (mg L ⁻¹)	135,26	219,00	58,00	36,09
Temperatura (°C)	25,68	36,20	15,80	4,62
pH	7,07	7,83	5,22	0,61

Sánchez-Román et al. (2007) utilizaram um efluente com as seguintes características: 177,35 mgDQO L⁻¹ e 30,16 mg L⁻¹ de SST. Estes padrões do efluente têm menor concentração do que o utilizado nos três reatores solares no presente trabalho. Entretanto, de modo similar aos nossos resultados, estes autores também relataram melhorias nos padrões de qualidade do efluente durante a desinfecção solar, embora não tenham explicado as causas deste fenômeno. A seguir, na discussão das alterações da qualidade do efluente levantaremos algumas hipóteses sobre este assunto.

4.2 Alterações na qualidade do efluente

Segundo von Sperling et al. (2003) as lagoas de estabilização são utilizadas para o tratamento de águas residuárias, principalmente para a remoção de matéria orgânica. Porém, com algumas modificações na geometria é possível obter elevados índices na remoção de patógenos e nutrientes.

Neste contexto, os três reatores estudados no presente trabalho podem ser considerados modelos hidráulicos à escala de lagoas de estabilização para remoção de patógenos, ou seja, os reatores podem ser comparados com lagoas de maturação em pequena escala. Consequentemente, os processos de remoção de matéria orgânica nas lagoas podem ser utilizados para justificar as alterações nos padrões de qualidade do efluente em tratamento nos três reatores.

Durante todas as repetições do experimento observaram-se diminuições nas concentrações de matéria orgânica nos três reatores como pode ser observado na Figura 15 e Figura 16. Segundo von Sperling et al. (2003) a estabilização da matéria orgânica em lagoas ocorre por dois processos: 1) Sedimentação da fração particulada e 2) Ação de bactérias facultativas.

Na Figura 17 e Figura 18 é mostrado o comportamento da concentração de SST nos três reatores durante as quatro repetições. Os dados mostram que a concentração de SST tende a diminuir no início e posteriormente se estabiliza mantendo um patamar com variações mínimas.

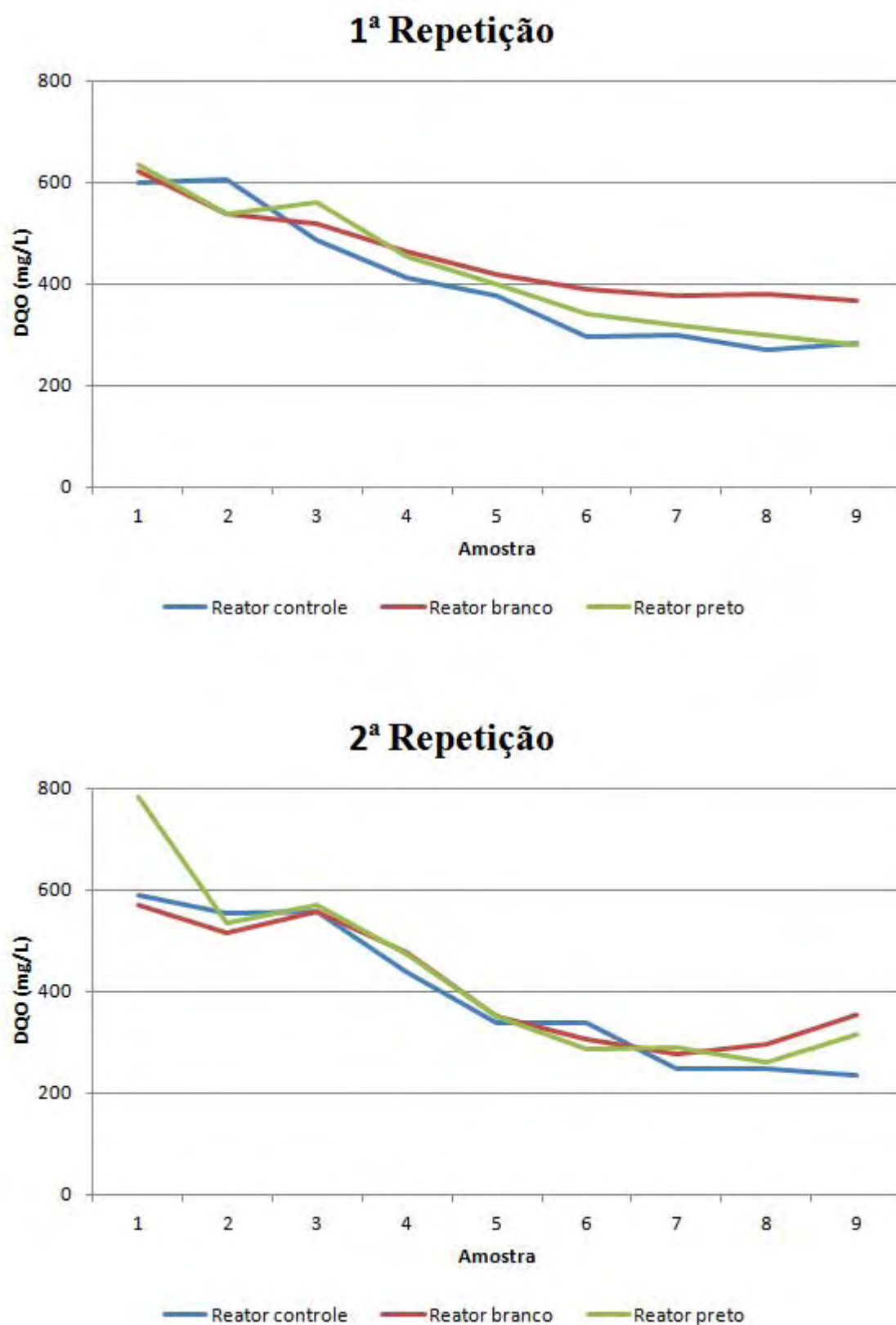


Figura 15 – Concentração de matéria orgânica nos três reatores durante a primeira e segunda repetição.

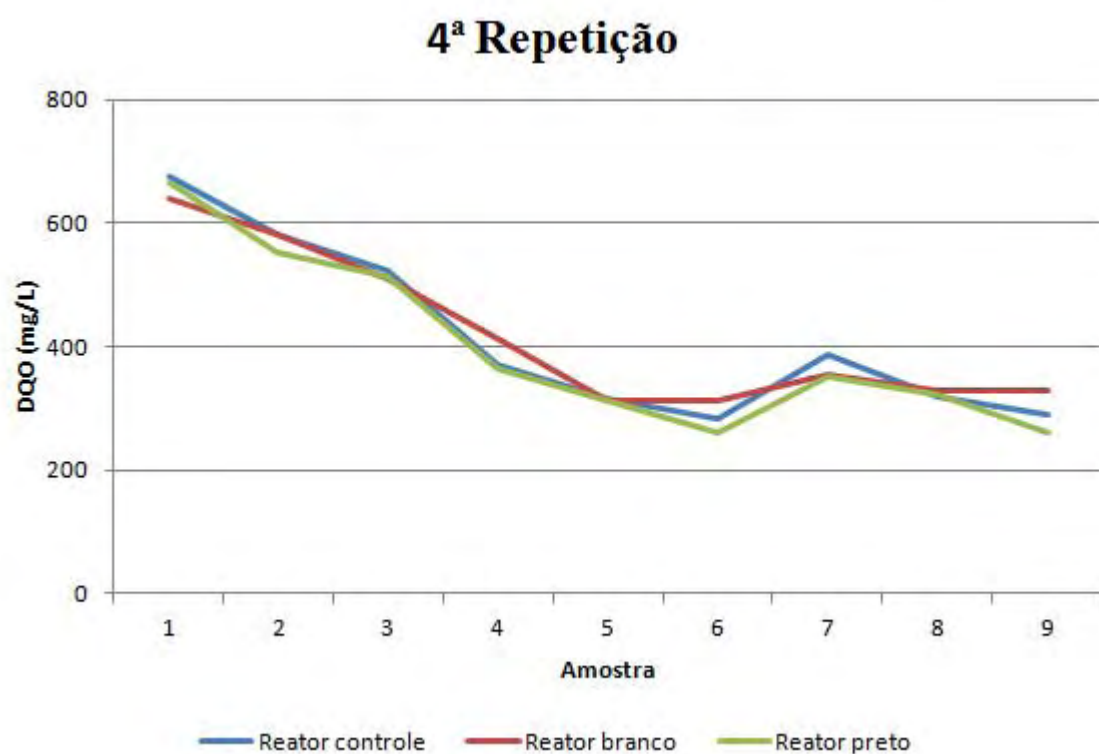
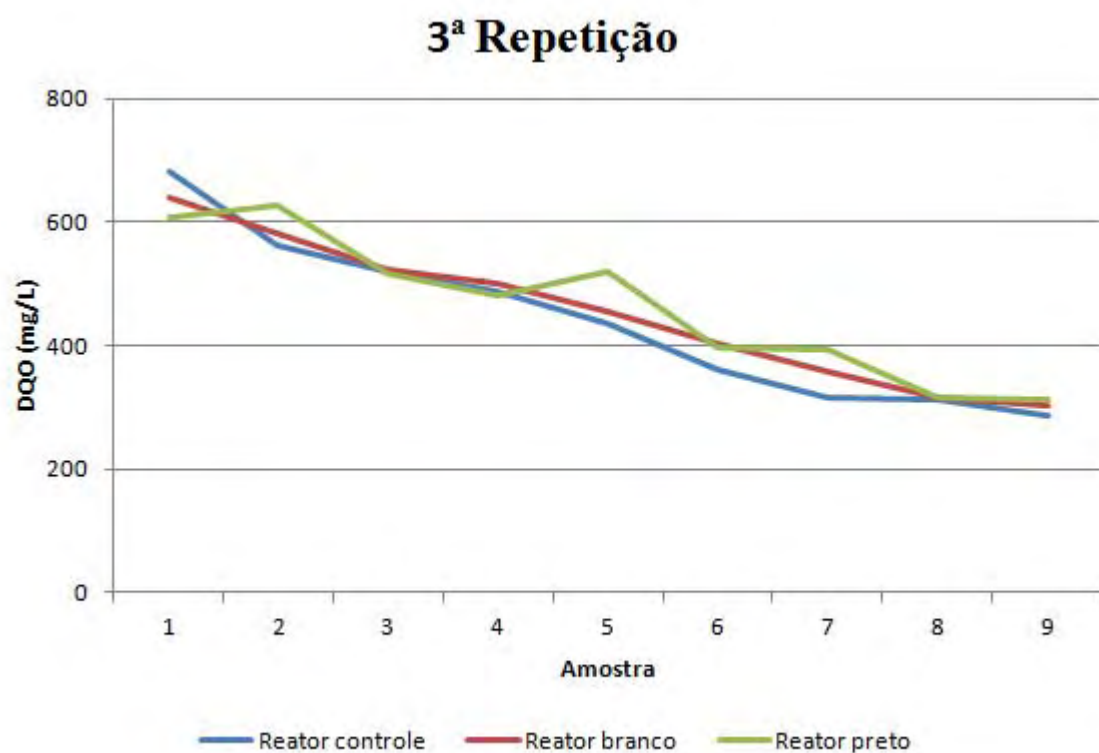


Figura 16 - Concentração de matéria orgânica nos três reatores durante a terceira e quarta repetição.

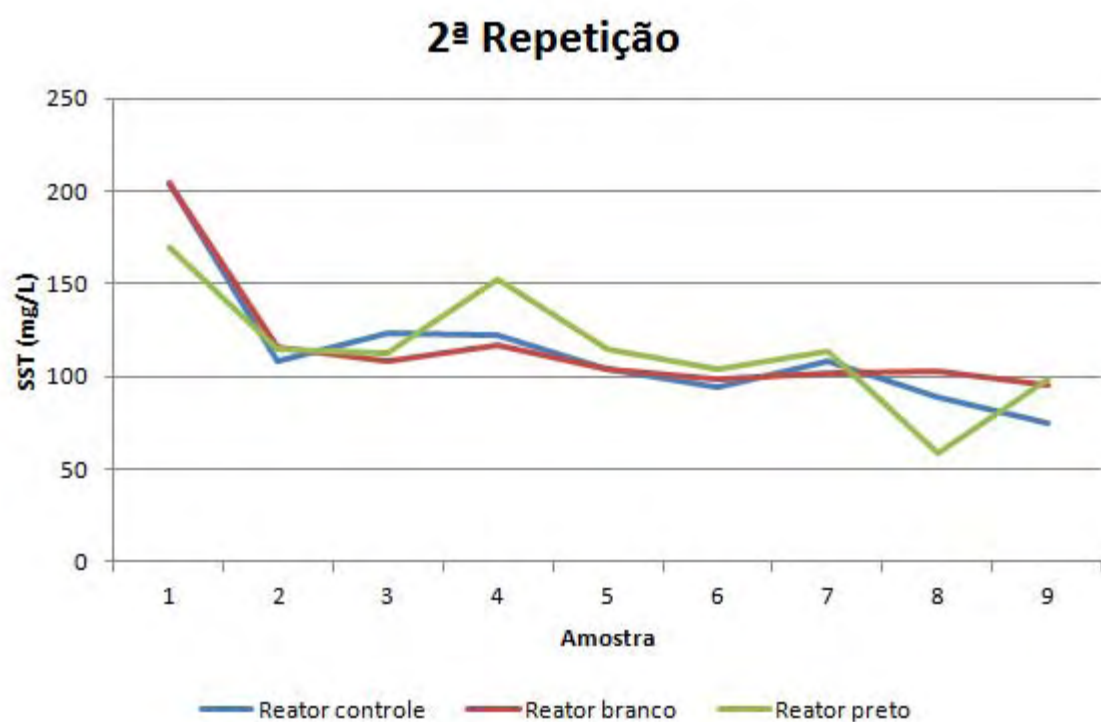
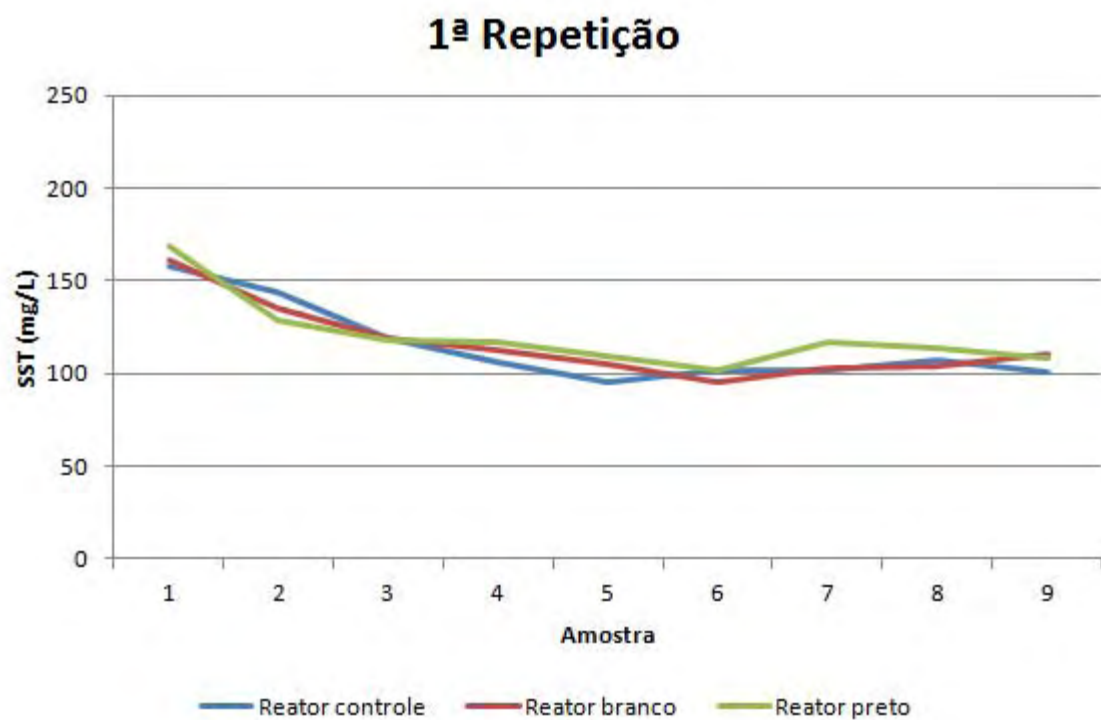


Figura 17 - Concentração de sólidos suspensos totais nos três reatores durante a primeira e segunda repetição.

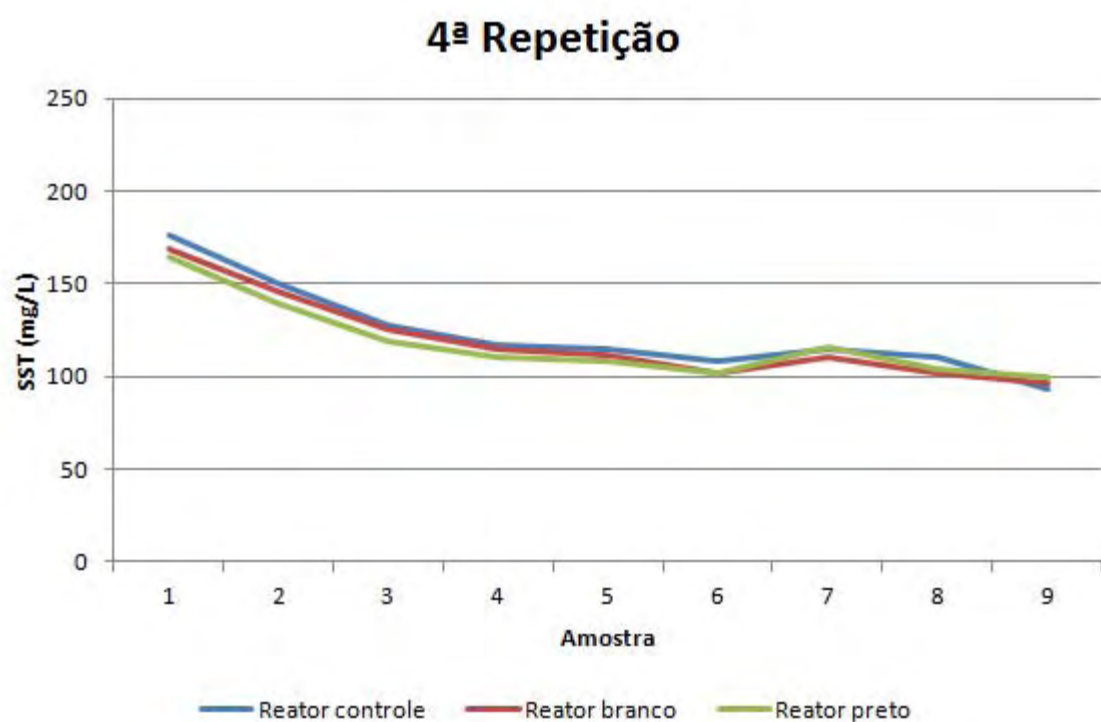
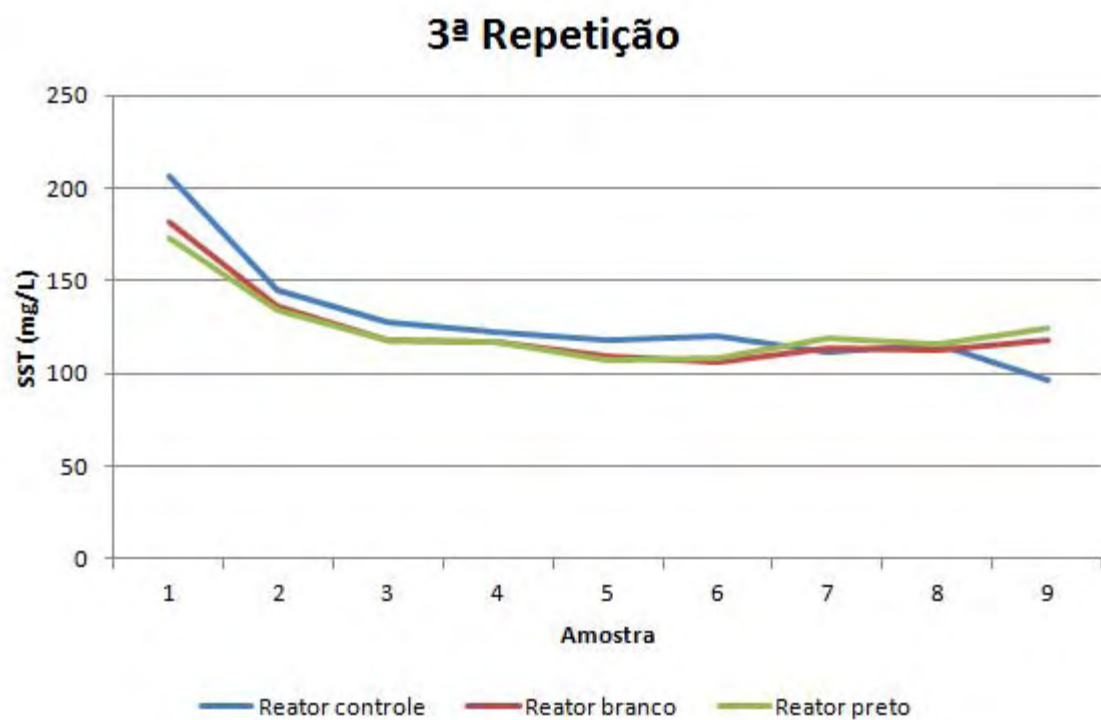


Figura 18 - Concentração de sólidos suspensos totais nos três reatores durante a terceira e quarta repetição.

Portanto, a diminuição na concentração de DQO do efluente pode ser justificada pela sedimentação de material particulado até o momento que a concentração de SST atinge o patamar de estabilização. Após a concentração de sólidos suspensos entrar em equilíbrio a estabilização da matéria orgânica continua (concentração de DQO diminui constantemente). Possivelmente esse fenômeno ocorre devido à ação de microrganismos, conforme mencionado por von Sperling et al. (2003).

Entretanto, para melhor compreensão das alterações na qualidade da água residuária em tratamento mais trabalhos devem ser realizados incluindo parâmetros como oxigênio dissolvido, turbidez, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e outros microrganismos além dos coliformes totais e fecais.

4.3 Variações na temperatura

Segundo Bitton (2011) a inativação dos patógenos pela desinfecção solar ocorre devido ao sinergismo entre a radiação UV-A e a temperatura elevada da água. Temperaturas entre 20 e 40°C não afetam a inativação de bactérias por radiação UV, mas temperaturas iguais ou superiores a 45°C aceleram o processo de desinfecção solar (MALATO et al. 2009).

O estudo de Dunlop et al. (2011) utilizou sacolas plásticas como reatores para desinfecção solar. Os resultados comprovam que quando a temperatura da água nos reatores é superior a 45°C a desinfecção solar ocorre de modo mais eficiente.

Além disso, segundo Ubomba-Jaswa et al. (2010) quando a temperatura da água excede 45°C, é possível inativar completamente bactérias em águas com elevada turbidez (100 NTU).

Portanto, tendo em vista que o efluente de tanques sépticos apresenta elevada concentração de coliformes fecais e de SST, a finalidade do presente trabalho foi utilizar diferentes colorações em reatores solares com o intuito de elevar a temperatura do efluente ($\geq 45^{\circ}\text{C}$) durante a desinfecção e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do processo.

Nas Figuras 19 a 22 são mostradas a radiação solar global incidente e as variações das temperaturas dos três reatores de desinfecção solar durante os três dias de cada uma das quatro repetições do experimento.

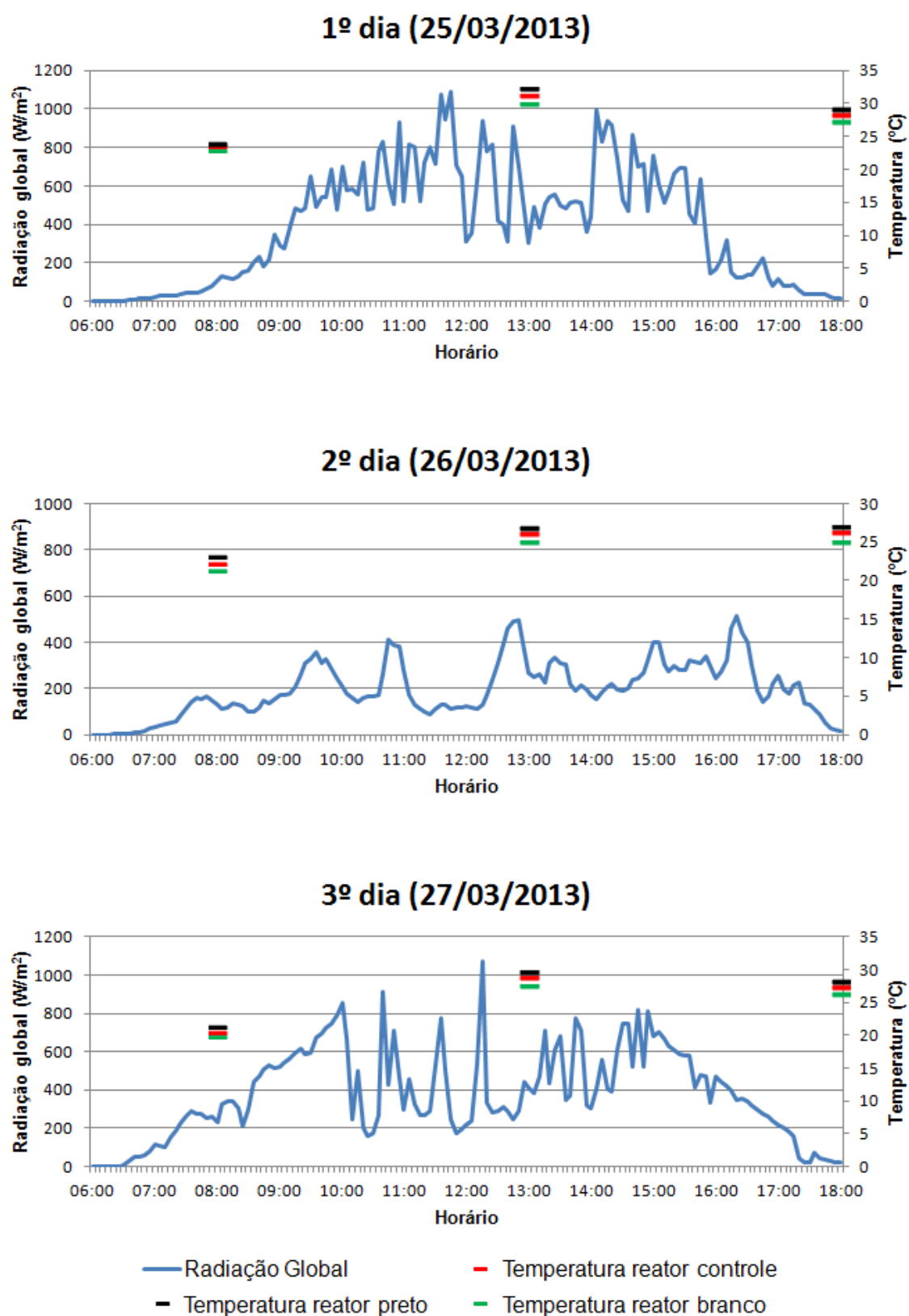


Figura 19 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a primeira repetição do experimento.

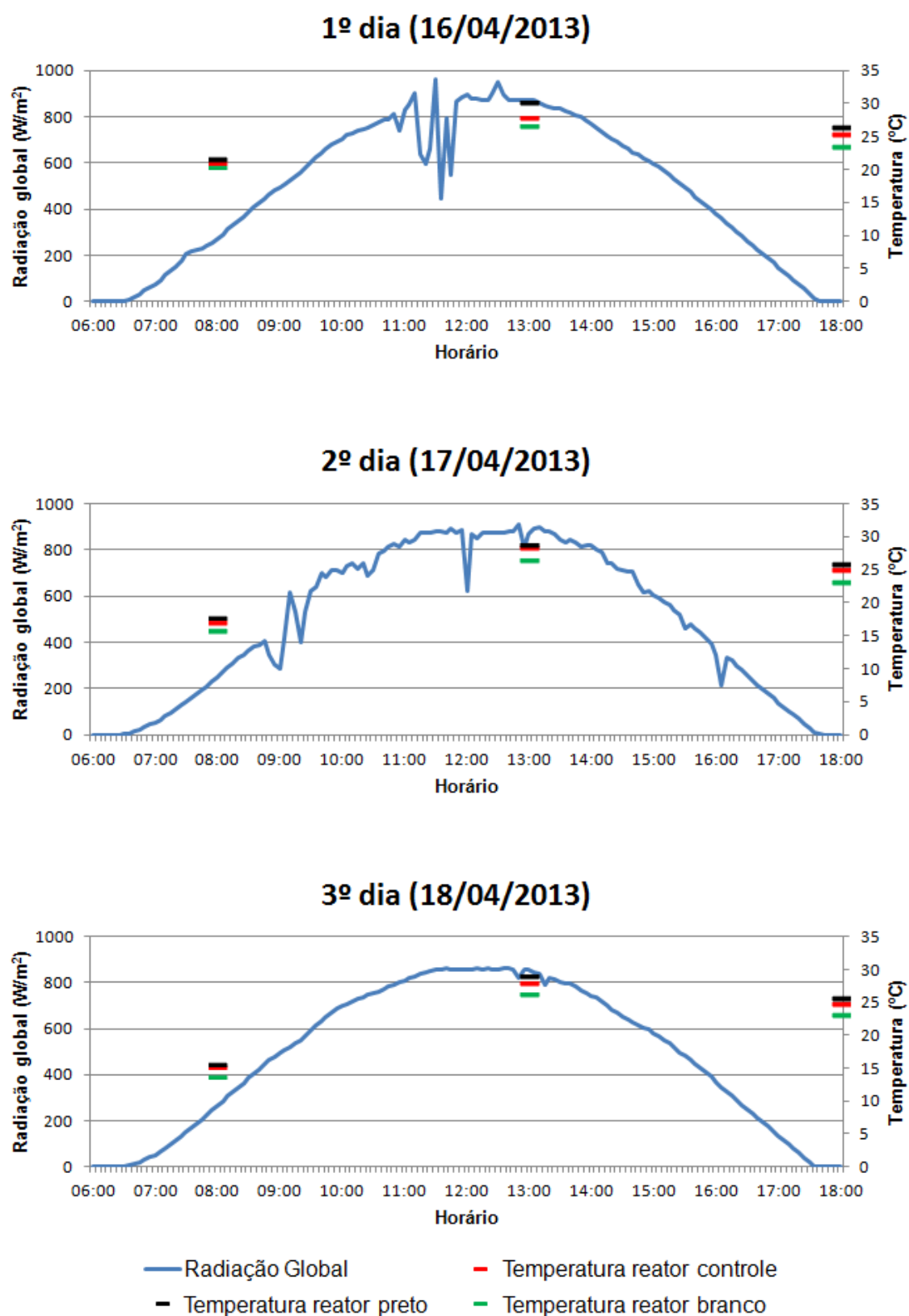


Figura 20 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a segunda repetição do experimento.

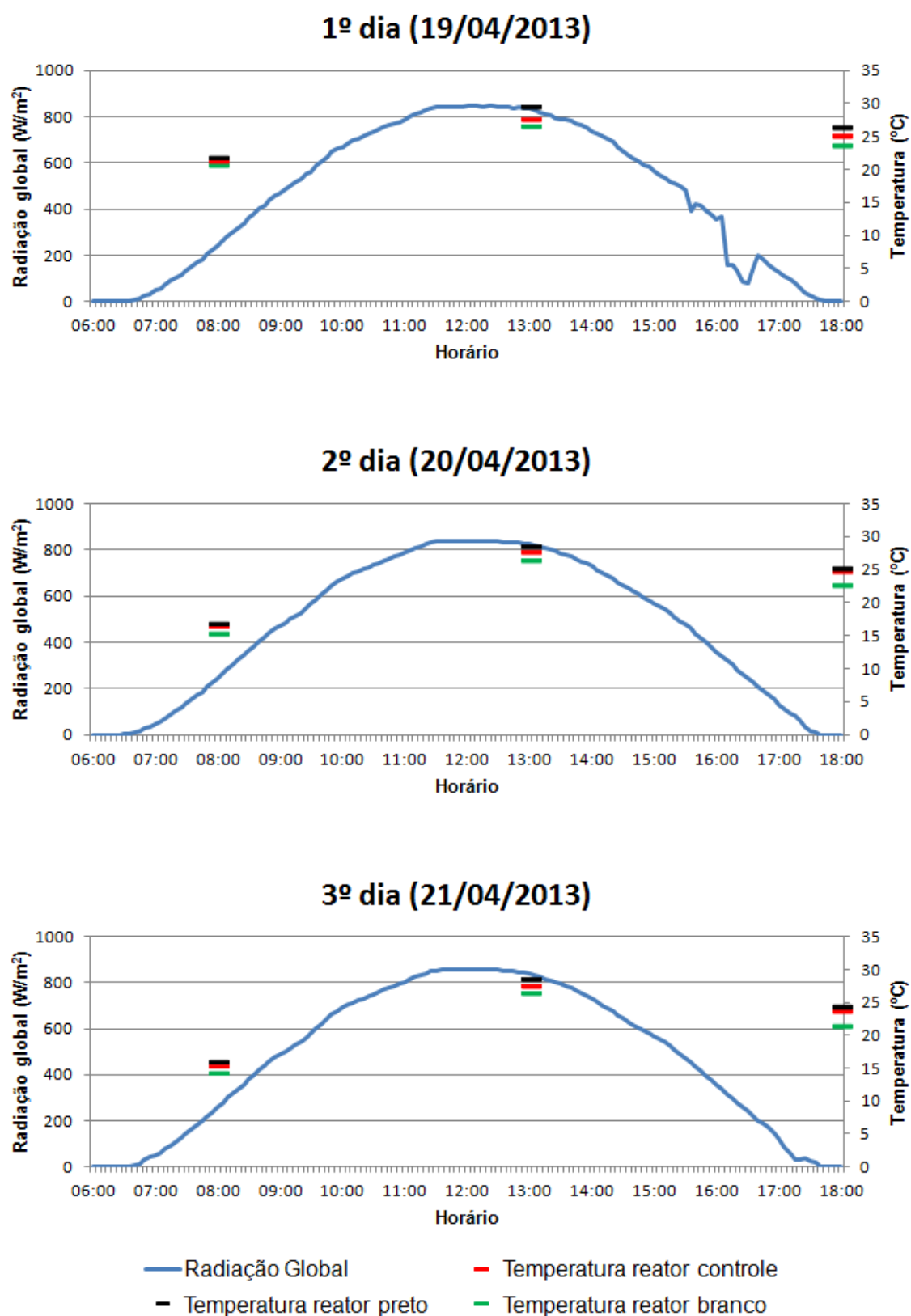


Figura 21 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a terceira repetição do experimento.

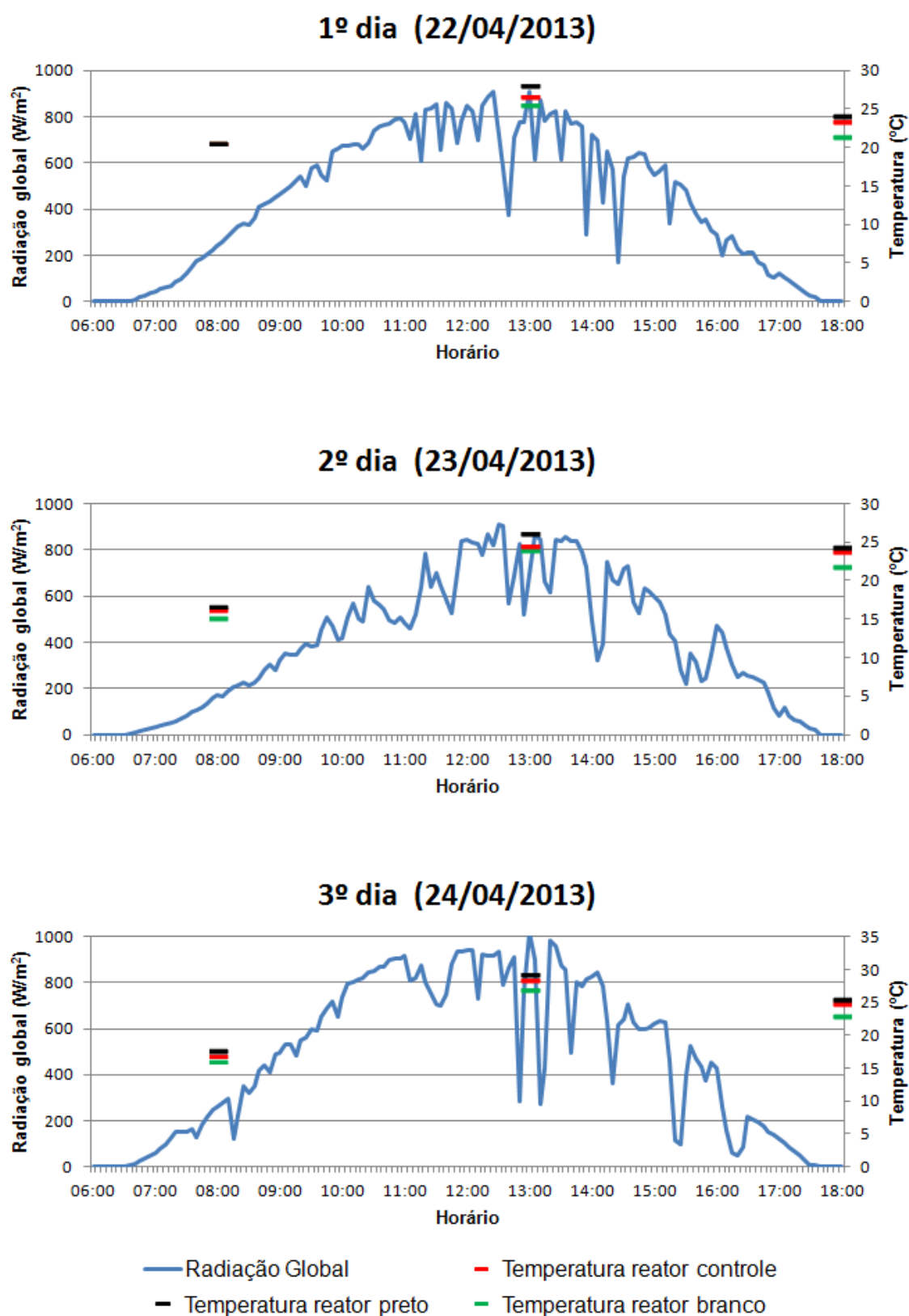


Figura 22 - Radiação global incidente e temperatura do efluente nos três reatores durante a quarta repetição do experimento.

O uso de diferentes cores propiciou uma diferença nas temperaturas dos reatores, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Temperatura do efluente nos três reatores

Amostra	1ª Repetição			2ª Repetição			3ª Repetição			4ª Repetição		
	RB	RC	RP	RB	RC	RP	RB	RC	RP	RB	RC	RP
1	22,9	23,5	24,0	20,5	21,0	21,6	20,7	21,4	21,8	20,7	20,6	20,6
2	30,0	31,2	32,4	26,7	27,9	30,2	26,6	27,7	29,5	25,6	26,6	28,1
3	27,3	28,4	29,3	23,6	25,5	26,5	23,8	25,2	26,5	21,5	23,4	24,2
4	21,3	22,3	23,1	15,8	17,0	17,7	15,4	16,4	17,0	15,2	16,2	16,6
5	25,0	26,2	26,8	26,5	28,3	28,7	26,5	27,6	28,6	24,0	24,5	26,0
6	25,0	26,3	26,9	23,3	25,0	25,8	22,7	24,7	25,4	21,9	23,8	24,3
7	19,9	20,7	21,4	13,9	15,4	15,8	14,6	15,6	16,1	16,1	17,0	17,8
8	27,6	29,0	29,7	26,5	28,2	29,2	26,7	27,7	28,7	27,0	28,5	29,4
9	26,5	27,5	28,3	23,5	25,0	25,8	21,8	23,9	24,5	23,1	25,0	25,6

RB – Reator Branco; RC – Reator Controle; RP – Reator Preto.

Com a exceção de uma amostra (primeira amostra da 4ª repetição) todas as temperaturas obtidas nos reatores preto e branco sempre foram respectivamente, a maior e a menor temperatura. As diferenças entre as temperaturas do reator preto e do reator branco foram muito pequenas a diferença máxima foi de 3,5°C e a média entre as diferenças foi de 2,06 °C.

A temperatura máxima ocorreu no reator preto em uma das baterias incompletas do experimento e foi igual a 36,2°C, valor inferior aos 45°C sugeridos por Malato et al. (2009). O experimento foi realizado no início do outono (25/03/2013 a 25/04/2013), eventualmente em outras épocas do ano como, por exemplo, no verão, temperaturas superiores podem ser obtidas. Sendo assim, o uso do sistema em sinergismo com a temperatura pode ficar restrito ao verão.

4.4 Análise estatística

Na Figura 23 é mostrada a população remanescente de coliformes fecais (y – é a razão entre a população atual (N) e a população inicial (N_0)) em relação à dose de radiação solar global em cada um dos três reatores estudados. Observa-se comportamento similar nas amostras dos três reatores, com queda acentuada na população de coliformes fecais nos primeiros 20 MJ m⁻² de radiação solar acumulada.

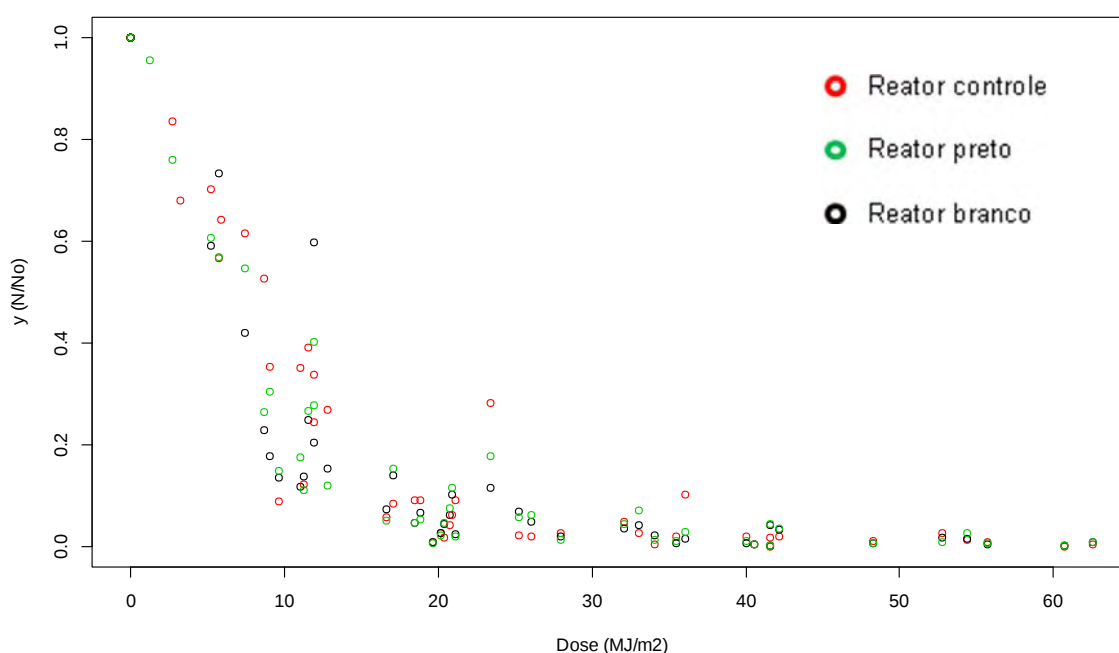


Figura 23 - População remanescente de coliformes fecais em relação à dose de radiação solar nos três reatores.

Utilizando esses dados e análise de regressão foi ajustado um primeiro modelo matemático que representa a população remanescente de CF em águas residuárias domésticas após serem expostas à radiação solar global (RG) para cada reator. Os modelos são:

- Reator Branco: $y = (\exp(1,936 - 0,2321 \cdot RG)) / (1 + (\exp(1,936 - 0,2321 \cdot RG)))$
- Reator Controle: $y = (\exp(2,1111 - 0,2321 \cdot RG)) / (1 + (\exp(2,1111 - 0,2321 \cdot RG)))$

- Reator Preto: $y = (\exp(2,00396 - 0,2321 \cdot RG)) / (1 + (\exp(2,00396 - 0,2321 \cdot RG)))$

A representação gráfica dos três modelos pode ser observada na Figura 24.

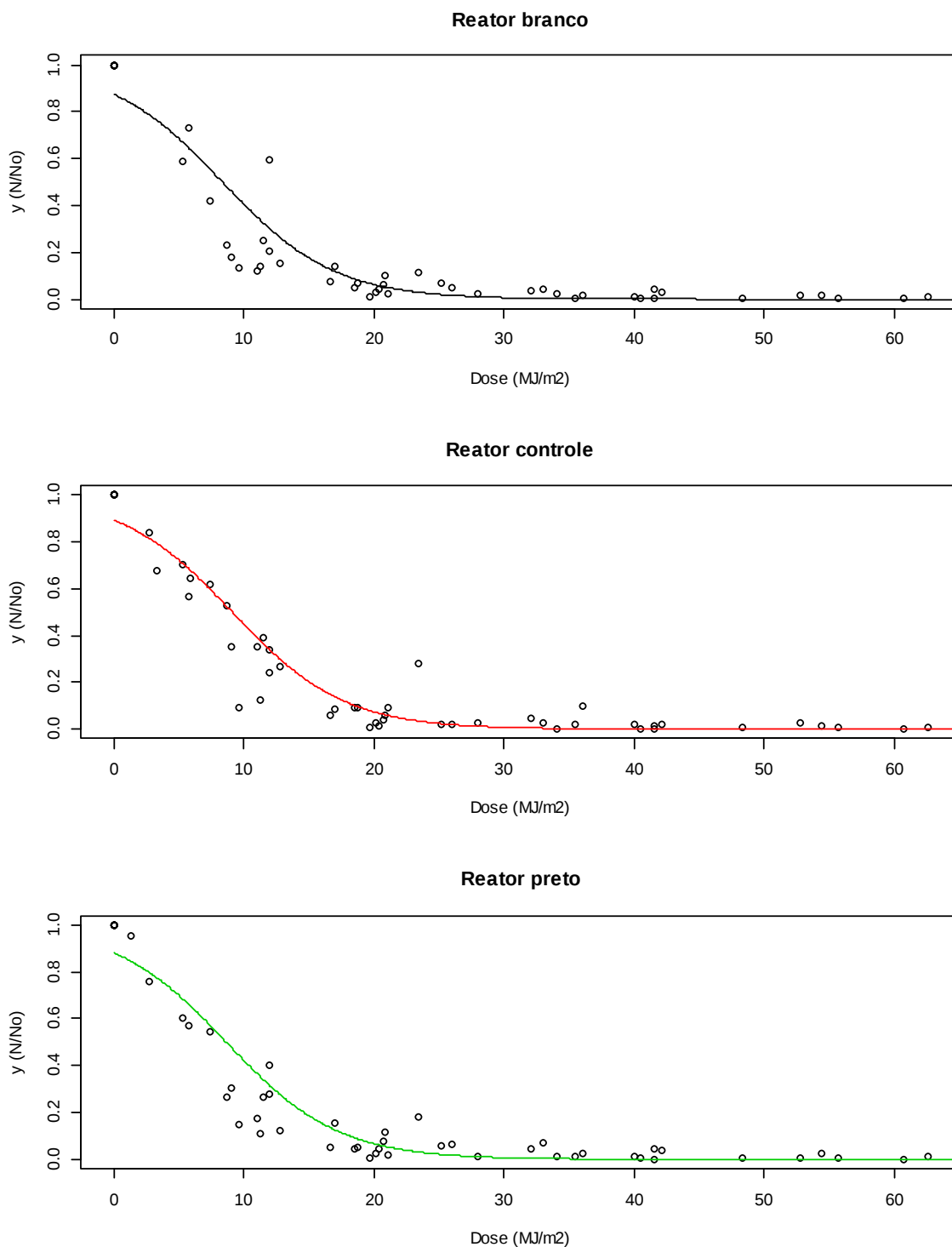


Figura 24 – Modelos sigmoides ajustados por tratamento.

Comparando-se os três modelos (Figura 25) observa-se que existe uma elevada semelhança e a principal diferença está relacionada ao intercepto dos mesmos.

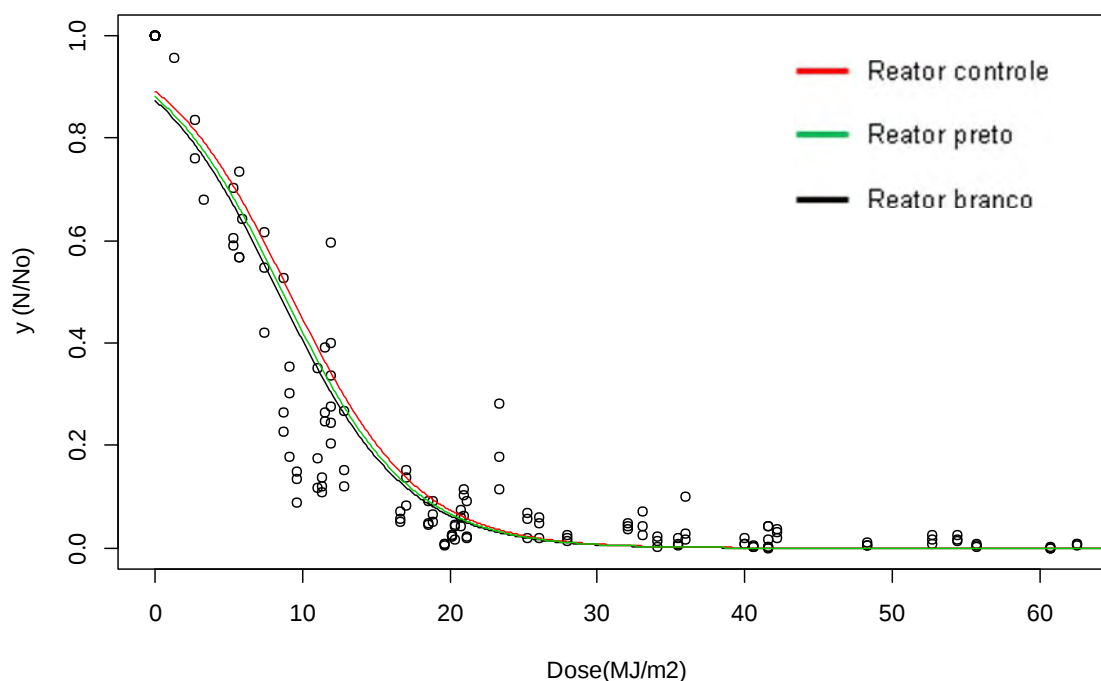


Figura 25 – Comparação entre os modelos ajustados para cada tratamento.

Os dados obtidos na estatística descritiva dos três modelos (Tabela 6) indicam que os tratamentos não apresentam diferença estatística significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 6 - Estatística descritiva dos três modelos sigmóides ajustados

	Estimado	Erro padrão	Valor z	Pr(> z)
Branco	1,936	1,388e-01	14	< 2e-16
Controle	1,751e-01	1,962e-01	1	0,372
Preto	6,796e-02	1,962e-01	0	0,729
Radiação Global (RG)	-2,321e-01	3,987e-05	-5822	< 2e-16

Por esta razão, os dados dos três tratamentos foram agrupados e ajustados em um único modelo conforme a equação (3):

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\exp(2,017 - 0,2321RG)}{(1 + \exp(2,017 - 0,2321RG))} \quad (3)$$

Em que N é a população de CF após o efluente sanitário ser exposto à radiação solar (NMP/100 mL); N_0 a população inicial de CF presente (NMP/100 mL); RG é a dose de radiação solar recebida pelas águas residuárias domésticas (MJ m^{-2}).

Na Tabela 7 estão descritos os valores obtidos na análise de variância entre o modelo agrupado (equação 3) e os modelos ajustados para cada tratamento.

Tabela 7 – Análise de variância entre o modelo agrupado e os modelos individuais

Modelo	GL	AIC	BIC	Pr(>Chisq)
Agrupado	3	22008572	22008581	
Individual	5	22008575	22008591	0.6723

GL – Graus de liberdade

Os resultados obtidos mostram que a 5% de probabilidade não há diferença significativa entre os modelos. Este dado corrobora com os resultados obtidos na Tabela 6. Indicando, portanto, que o uso de diferentes colorações nos reatores solares não alterou a eficiência da desinfecção solar.

O modelo agrupado ajustado foi comparado ao modelo desenvolvido por Sánchez-Román et al. (2007) (equação 1) como pode ser observado na Figura 26. Ambos os modelos têm comportamento similar (sigmoide), porém, o modelo desses autores apresenta um queda mais acentuada nos primeiros 20 MJ m^{-2} de radiação solar acumulada.

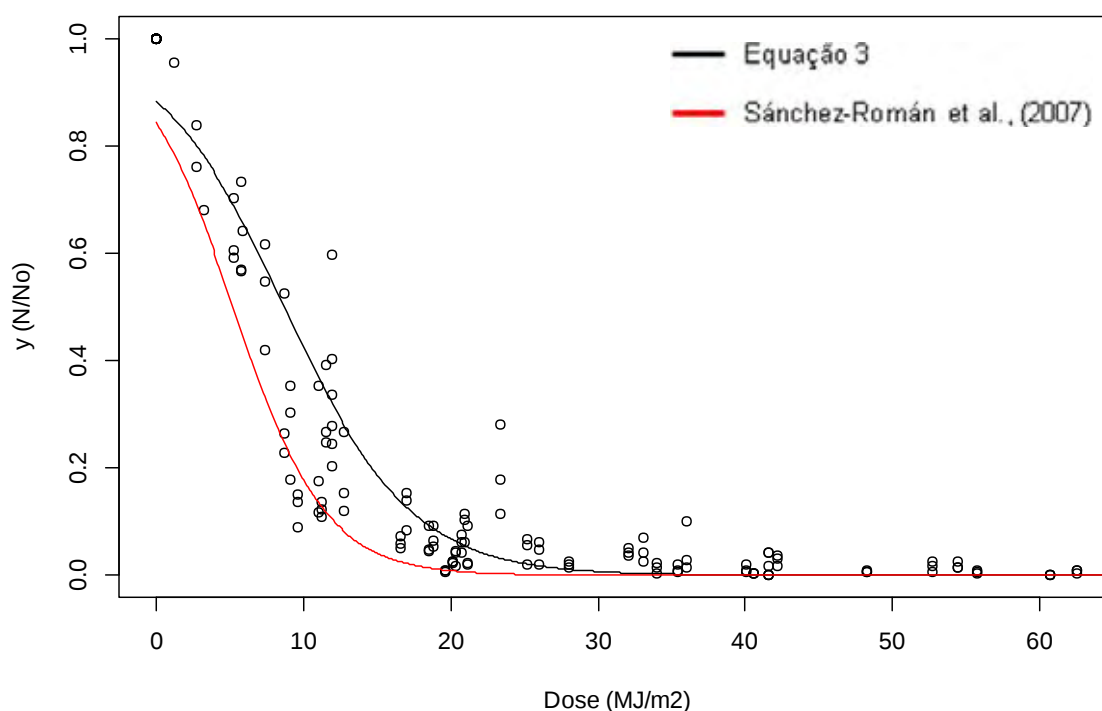


Figura 26 – Comparação entre o modelo agrupado ajustado e o modelo de Sánchez-Román et al. (2007).

Dois motivos podem justificar a evidente diferença entre os modelos:

- 1) *A característica do efluente:* a água residuária utilizada por Sánchez-Román et al. (2007) apresentava menor concentração de SST e DQO. Dessa maneira, existiam poucas barreiras para proteger os microrganismos e a radiação solar penetrava na lâmina d'água com maior facilidade, ou seja, era necessária uma quantidade menor de radiação solar para inativar os CF.
- 2) *O método de mensuração de radiação solar:* a mensuração utilizada por Sánchez-Román et al. (2007) difere da utilizada no presente trabalho. O piranômetro utilizado no trabalho desses autores foi instalado no fundo do reator e, portanto, considerava somente a radiação solar que atravessava a lâmina d'água e a medição do presente trabalho foi realizada com a radiação incidente na superfície do efluente.

Portanto, os modelos foram desenvolvidos em diferentes condições e, conseqüentemente, não é adequado compará-los.

Na Figura 27 estão demonstradas a distribuição dos resíduos e a normalidade do modelo agrupado ajustado.

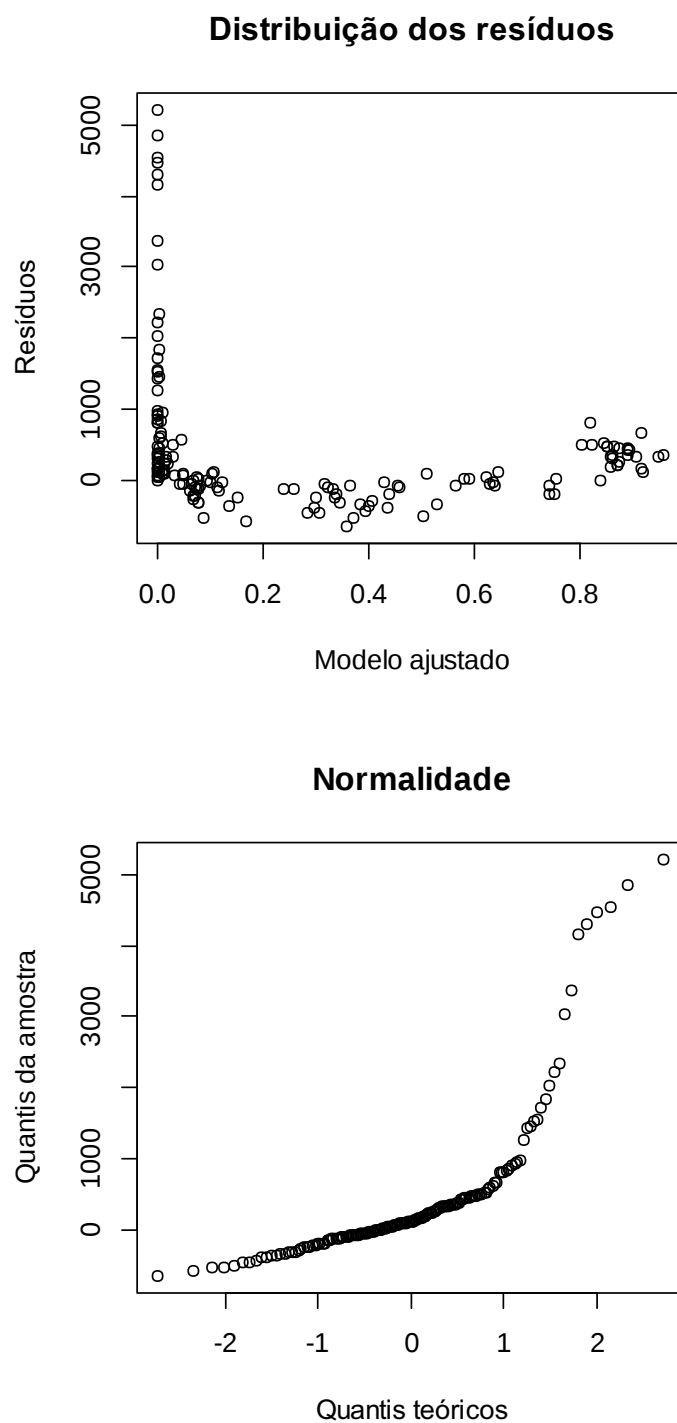


Figura 27 – Distribuição dos resíduos e normalidade do modelo agrupado ajustado.

Os gráficos mostram que existe uma elevada falta de ajuste do modelo, indicando, que a função adotada para ajustar o modelo não é adequada para o conjunto de dados coletados.

Desta maneira, os dados foram analisados em uma segunda aproximação utilizando função linear simples e adotando como variável resposta a redução logarítmica da população de coliformes fecais ($\text{LOG reduzido} = \log(1/y)$). Na Figura 28 é mostrada a redução logarítmica de CF em relação à dose de radiação solar global.

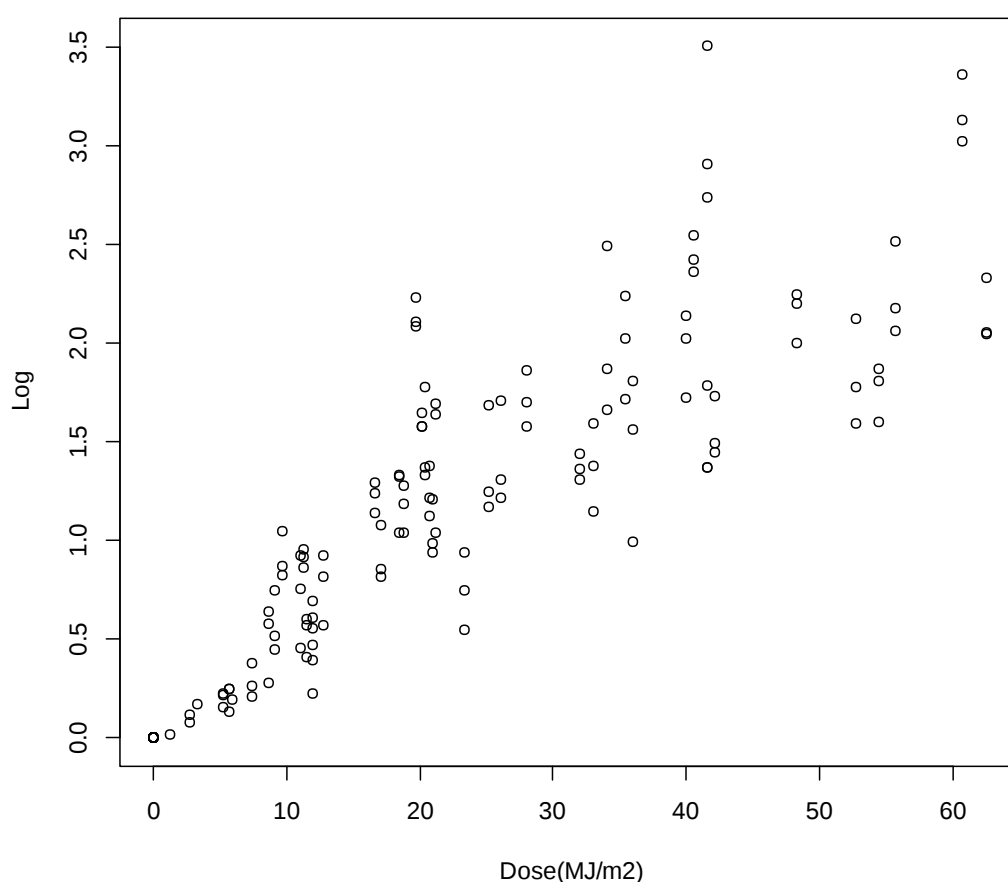


Figura 28 – Redução logarítmica de coliformes fecais em relação à dose de radiação solar.

Com base nos dados obtidos no experimento foram ajustados 12 modelos matemáticos lineares com a redução logarítmica da população de coliformes fecais como variável resposta. Os modelos estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelos ajustados com regressão linear e seus respectivos valores de AIC e BIC

ID	Modelo ^(a)	AIC ^(b)	BIC ^(c)
I	$\text{Logred} = 2,0488041 + 1,0311354 \cdot \text{RUV} - 0,0141384 \cdot \text{RG} + 0,0422974 \cdot \text{FUV} - 0,0099408 \cdot \text{T} - 0,0048107 \cdot \text{SST} - 0,0003507 \cdot \text{DQO} - 0,1139057 \cdot \text{pH}$	125.87	153.26
II	$\text{Logred} = 1,3526724 + 0,9462034 \cdot \text{RUV} - 0,0128993 \cdot \text{RG} + 0,0264169 \cdot \text{FUV} - 0,0077028 \cdot \text{T} - 0,0055201 \cdot \text{SST} - 0,0002426 \cdot \text{DQO}$	125.06	149.41
III	$\text{Logred} = 1,238351 + 1,019292 \cdot \text{RUV} - 0,014777 \cdot \text{RG} + 0,027910 \cdot \text{FUV} - 0,009404 \cdot \text{T} - 0,005543 \cdot \text{SST}$	123.68	144.98
IV	$\text{Logred} = 1,2847796 + 0,8680155 \cdot \text{RUV} - 0,0099198 \cdot \text{RG} + 0,0199524 \cdot \text{FUV} - 0,0057328 \cdot \text{SST} - 0,0003471 \cdot \text{DQO}$	124.26	145.57
V	$\text{Logred} = 1,080301 + 0,956276 \cdot \text{RUV} - 0,011848 \cdot \text{RG} + 0,020055 \cdot \text{FUV} - 0,005843 \cdot \text{SST}$	123.65	141.91
VI	$\text{Logred} = 0,347024 + 1,510681 \cdot \text{RUV} - 0,030318 \cdot \text{RG} + 0,049441 \cdot \text{FUV} - 0,014080 \cdot \text{T}$	138.86	157.12
VII	$\text{Logred} = 1,184974 + 1,067930 \cdot \text{RUV} - 0,016463 \cdot \text{RG} - 0,006128 \cdot \text{SST}$	122.69	137.91
VIII	$\text{Logred} = 1,2315 + 0,034786 \cdot \text{FUV} + 0,030147 \cdot \text{RG} - 0,006822 \cdot \text{SST}$	128.10	143.31
IX	$\text{Logred} = 1,46359 + 0,030694 \cdot \text{RG} - 0,007579 \cdot \text{SST}$	129.37	141.54
X	$\text{Logred} = 1,254741 + 0,703179 \cdot \text{RUV} - 0,006492 \cdot \text{SST}$	121.75	133.92
XI	$\text{Logred} = 0,198141 + 0,041939 \cdot \text{RG}$	162.80	171.93
XII	$\text{Logred} = 0,15802 + 0,91713 \cdot \text{RUV}$	145.81	154.94

(a) RG – Radiação solar global (MJ m^{-2}); RUV – Radiação UV (MJ m^{-2}); FUV – Fração UV (%); T – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); SST – Sólidos suspensos totais (mg L^{-1}); DQO – Demanda química de oxigênio (mg L^{-1}); pH – Potencial hidrogeniônico.

(b) AIC – Akaike Information Criterion.

(c) BIC – Bayesian Information Criterion.

A avaliação dos parâmetros AIC e BIC da Tabela 8 mostra que os menores valores estão associados ao modelo X que é, portanto, o melhor ajuste. As variáveis significantes deste modelo são a radiação UV (RUV) e a concentração de sólidos suspensos (SST), achado corroborado pelos valores obtidos no teste “t” a 5% de probabilidade mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Teste “t” para os parâmetros avaliados

Coeficientes ^(a)	Estimado	Erro padrão	Valor t	Pr(> t) ^(b)
Trat-Branco (Intercepto)	2,0715833	0,7320007	2,830	0,00532 **
Trat-Controle	0,0174821	0,0726250	0,241	0,81011
Trat-Preto	0,0038686	0,0722343	0,054	0,95736
RUV	1,0387577	0,4045586	2,568	0,01125 *
RG	-0,0143166	0,0172604	-0,829	0,40821
FUV	0,0429389	0,0258657	1,660	0,09906.
T	-0,0102238	0,0077629	-1,317	0,18991
SST	-0,0048024	0,0014951	-3,212	0,00162 **
DQO	-0,0003429	0,0003357	-1,022	0,30864
pH	-0,1187770	0,1090918	-1,089	0,27806

(a) RG – Radiação solar global (MJ m^{-2}); RUV – Radiação UV (MJ m^{-2}); FUV – Fração UV (%); T – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); SST – Sólidos suspensos totais (mg L^{-1}); DQO – Demanda química de oxigênio (mg L^{-1}); pH – Potencial hidrogeniônico.

(b) ‘****’ 0.001; ‘***’ 0.01; ‘**’ 0.05; ‘.’ 0.1; ‘ ’ 1.

Na Tabela 10 estão descritos os valores estimados para os parâmetros do modelo X e seus respectivos valores para o teste “t”. O valor obtido para o R^2 deste modelo foi igual a 0,8277.

Tabela 10 - Estatística descritiva do modelo linear ajustado

	Estimado	Erro padrão	Valor t	Pr(> t) ^(a)
Intercepto	1,254741	0,212898	5,894	2,35e-08 ***
RUV	0,703179	0,053311	13,190	< 2e-16 ***
SST	-0,006492	0,001231	-5,275	4,49e-07 ***

(a) '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1.

Considerando que o modelo X foi ajustado com a variável resposta sendo a redução logarítmica da população de coliformes fecais ($\log(1/y)$) o modelo pode ser reescrito conforme a equação (4):

$$y = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{10^{(1,254741 + 0,703179RUV - 0,006492SST)}} \quad (4)$$

Em que N é a população remanescente de *E. coli* após a água residuária doméstica ser expostas à componente UV da radiação solar (NMP/100 mL); N_0 a população inicial de *E. coli* presente na água residuária doméstica (NMP/100 mL); RUV é a dose de radiação UV acumulada (MJ m^{-2}); e SST é a concentração de sólidos suspensos totais (mg L^{-1}).

Na Figura 29 é mostrado gráfico da equação 4 para diferentes concentrações de sólidos suspensos totais (50, 100, 125, 150, 175 e 200 mg L^{-1}).

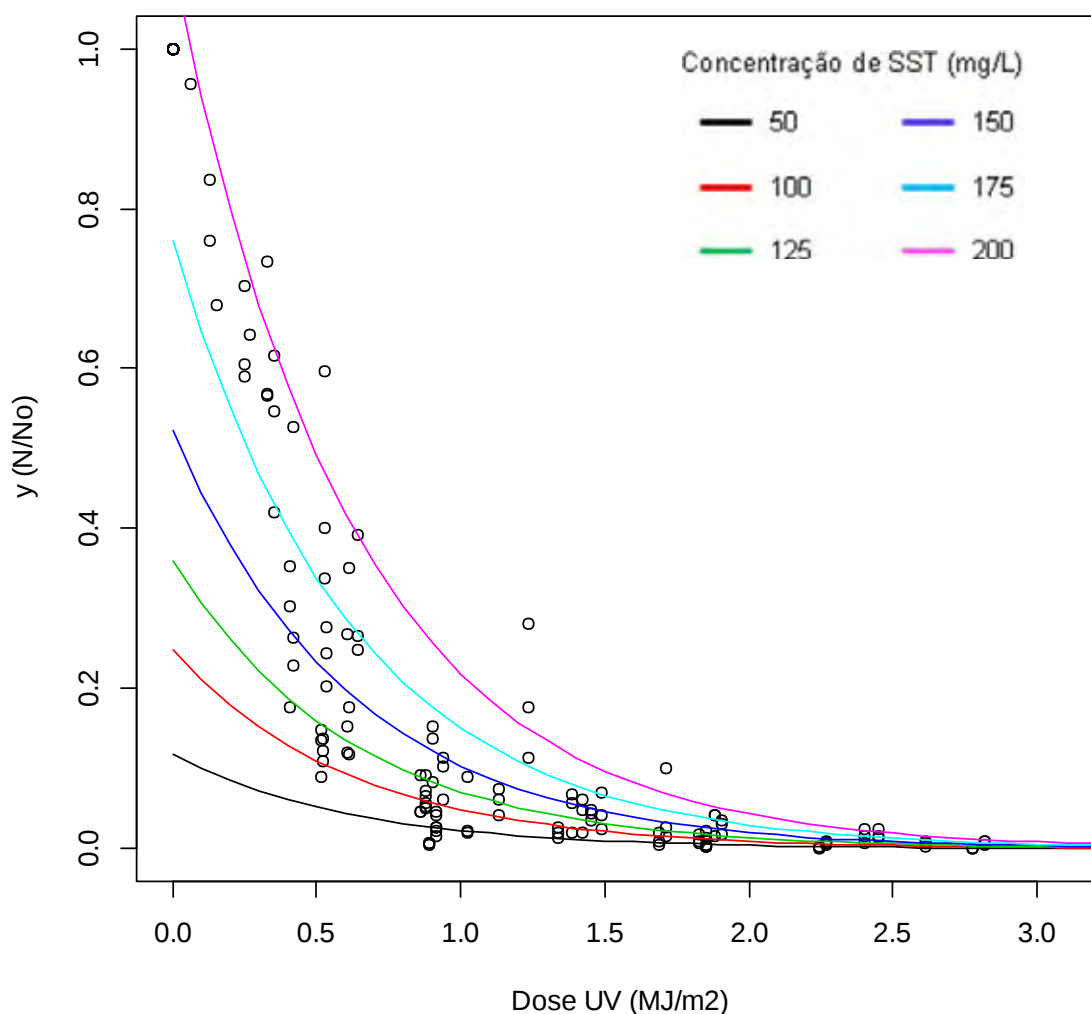


Figura 29 - Gráfico da população remanescente de *E. coli* após a água residuária doméstica ser exposta à componente UV da radiação solar para diferentes concentrações de sólidos suspensos totais, conforme a equação (4).

Na Figura 30 é mostrado gráfico de superfície para a mesma equação.

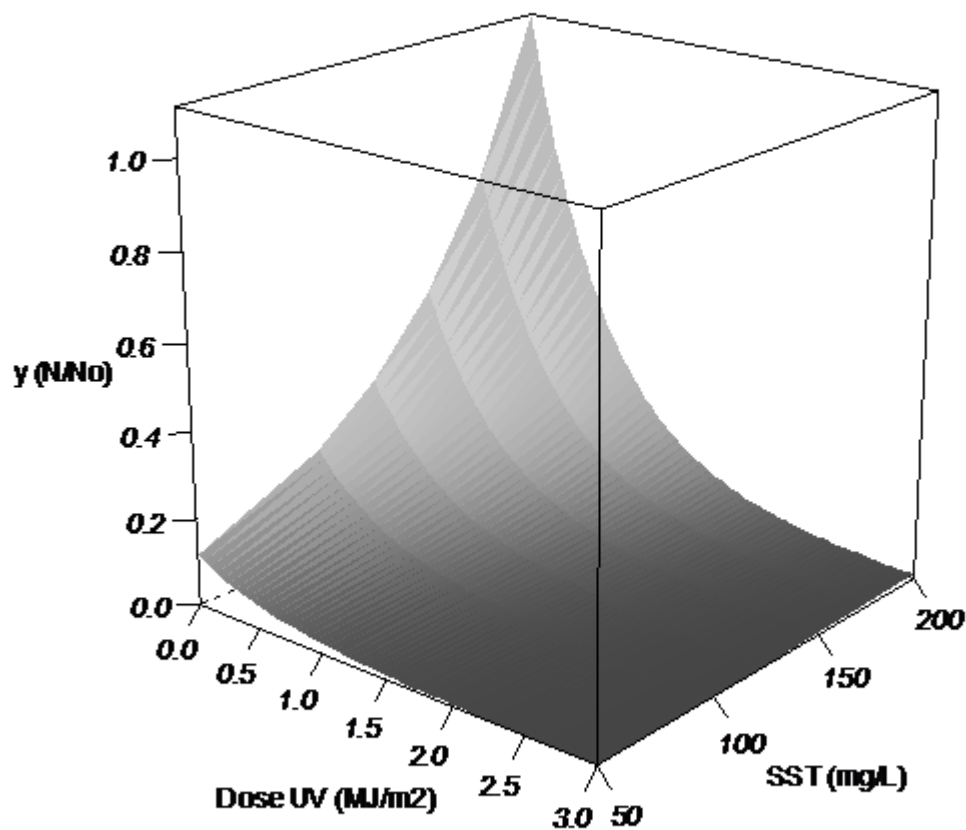


Figura 30 – Gráfico de superfície da população remanescente de *E. coli* após a água residuária doméstica ser expostas à componente UV da radiação solar para diferentes concentrações de sólidos suspensos totais, conforme a equação (4).

Ambos os gráficos (Figura 29 e Figura 30) descrevem o comportamento da equação 4 mostrando a variação da população remanescente de coliformes fecais com em relação aos parâmetros RUV e SST.

Na Figura 31 estão demonstradas a distribuição dos resíduos e a normalidade do modelo ajustado para equação 4.

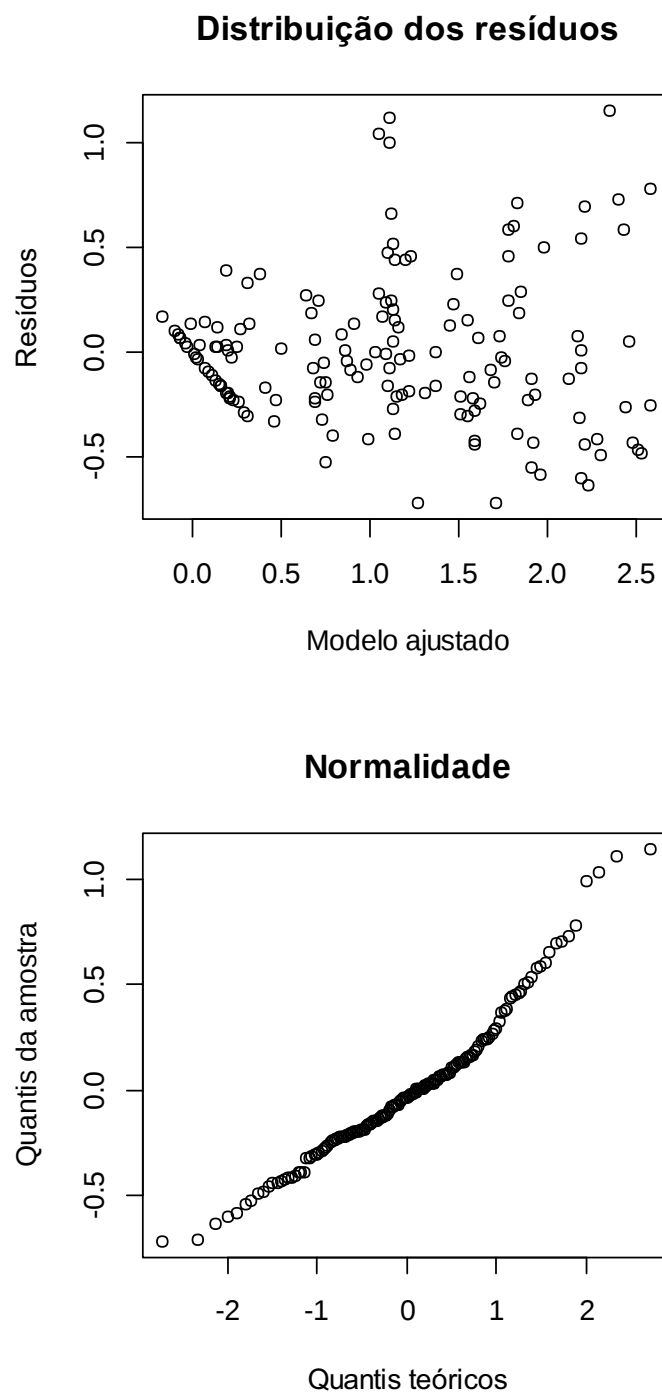


Figura 31 - Distribuição dos resíduos e normalidade do modelo ajustado para equação (4).

Os gráficos mostram que tanto a normalidade quanto a distribuição dos resíduos do modelo estão boas quando comparados aos gráficos de resíduos e de normalidade do modelo ajustado agrupado (Figura 27).

4.5 Simulação do modelo ajustado

Utilizando a metodologia recomendado por Allen et al. (1998) para o cálculo da radiação solar global e considerando a fração UV igual a 5% foi estimada a radiação UV média incidente em Botucatu/SP para todos os meses do ano.

Com base na equação 4 e nas estimativas de incidência de radiação UV para Botucatu determinou-se o tempo necessário para reduzir a população de CF de águas residuárias domésticas de $1,29 \times 10^6$ NMP 100 mL⁻¹ (valor médio obtido no presente trabalho, conforme Tabela 3) até o nível recomendado pela OMS para reúso na agricultura (≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹).

Salienta-se que as concentrações de SST não são constantes durante a SODIS, pois elas tendem a diminuir, porém, os cálculos realizados na simulação do modelo ajustado consideraram as concentrações constantes e, consequentemente, os resultados obtidos representam o tempo máximo necessário para a desinfecção. Na Tabela 11 são mostrados os resultados obtidos.

Tabela 11 – Estimativa do tempo necessário para a desinfecção de águas residuárias domésticas em Botucatu/SP para reúso na agricultura irrigada utilizando a equação (4)

Mês	Radiação Global (MJ m ⁻²)	Radiação UV (MJ m ⁻²)	Dias para desinfetar					
			Concentração de SST (mg/L)					
			50	100	125	150	175	200
Jan	19,92	1,00	3,11	3,58	3,81	4,04	4,27	4,51
Fev	18,79	0,94	3,30	3,79	4,04	4,28	4,53	4,78
Mar	17,39	0,87	3,57	4,10	4,36	4,63	4,89	5,16
Abr	16,69	0,83	3,72	4,27	4,54	4,82	5,10	5,38
Mai	13,89	0,69	4,47	5,13	5,46	5,79	6,13	6,46
Jun	12,49	0,62	4,97	5,71	6,08	6,45	6,81	7,19
Jul	14,45	0,72	4,29	4,93	5,25	5,57	5,89	6,21
Ago	16,31	0,82	3,80	4,37	4,65	4,93	5,22	5,50
Set	16,39	0,82	3,78	4,35	4,63	4,91	5,19	5,48
Out	19,41	0,97	3,19	3,67	3,91	4,15	4,38	4,62
Nov	21,96	1,10	2,82	3,24	3,45	3,66	3,87	4,09
Dez	20,28	1,01	3,06	3,51	3,74	3,97	4,20	4,43

Os dados mostram que para todos os meses, o tempo de exposição necessário para desinfecção é menor nas menores concentrações de SST e que para todas as concentrações, o mês de junho e o mês de novembro apresentam, respectivamente, o maior e o menor tempo de exposição.

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

1. O sistema desenvolvido foi eficiente na desinfecção de águas residuárias domésticas.
2. O uso de diferentes colorações nos reatores de desinfecção solar não alterou a eficiência do processo.
3. As variáveis mais importantes na desinfecção solar são a componente UV-A da radiação solar global e a concentração de sólidos suspensos totais.
4. Para as mesmas condições de realização do presente trabalho a população remanescente de *E.coli* em águas residuárias domésticas após serem expostas à radiação solar pode ser calculada pela equação:

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

Em que N é a população remanescente de *E. coli* após a água residuária doméstica ser expostas à componente UV da radiação solar (NMP/100 mL); N_0 a população

inicial de *E. coli* presente na água residuária doméstica (NMP/100 mL); RUV é a dose de radiação UV-A acumulada (MJ m^{-2}); e SST é a concentração de sólidos suspensos totais (mg L^{-1}).

5. Para as condições climáticas do município de Botucatu/SP e para concentrações constantes de sólidos suspensos totais o tempo necessário para a desinfecção solar de águas residuárias domésticas de $1,29 \times 10^6$ NMP 100 mL^{-1} até 1.000 NMP 100 mL^{-1} pode variar de 2,82 a 7,19 dias, dependendo da época do ano.

6. REFERÊNCIAS

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. 55 p.

AISSE, M. M. et al. CLORAÇÃO E DESCLORAÇÃO. In: Rede Cooperativa de Pesquisas, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas: Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia.** Rio de Janeiro: Abes, 2003. p. 113-168.

ALLEN R. G. et al. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements.** Roma: Food And Agriculture Organization Of The United Nations, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and drainage paper 56).

ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.** Brasília-df: Ana, 2009. 204 p.

ANGELAKIS A. N.; KOUTSOYIANNIS, D.; TCHOBANOGLIOUS, G.. Urban Wastewater and Stormwater Technologies in Ancient Greece. **Water Research**, Delft, Netherlands, v. 39, n. 1, p.210-220, 2005.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination for water and wastewater.** 21. ed. Washington, Dc: APHA-AWWA-WEF, 2005. 1220 p.

ARCHER, A. et al. Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques. **Water Research**, Delft, Netherlands, v. 31, n. 6, p.1398-1404, 1997.

ASANO, T. et al. **Water Reuse: Issues, Technologies and Applications.** New York: Mcgraw-hill Professional, 2007. 1570 p.

BITTON, G. **Wastewater Microbiology.** 4. ed. Hoboken, Nj, Usa: Wiley-blackwell, 2011. 781 p.

BOYLE, M. et al. Bacterial effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. **Applied And Environmental Microbiology**, Washington-dc, v. 74, n. 10, p.2997-3001, 2008. BURGESS, S.; ONYONGE, C. Solar disinfection of water (A case study from Kenya). Em: **28th WEBC Conference – Sustainable Environmental Sanitation and Water Services**, Kolkata (Calcutta), India, p.51-54, 2002.

CARR, G.; POTTER, R. B.; NORTCLIFF, S. Water reuse for irrigation in Jordan: Perceptions of water quality among farmers. **Agricultural Water Management**, v. 98, p.847-854, 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Rede Cooperativa de Pesquisas, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico, 2001. 544 p.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D.; RICARTE, R. M. Atualização da classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel - SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CBMET, 2006. p. 7.

DOWNES, A.; BLUNT, T. P. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. **Proc. R. Soc**, London, v. 28, p.488-500, 1877.

DRECHSEL, P. et al. **Informal irrigation in urban West Africa: An overview**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2006. (Research Report 102).

DUARTE, A. S. **Reuso de água residuária tratada na irrigação da cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.)**. 2006. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia (Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2006.

DUNLOP, P. S. M. et al. Inactivation and injury assessment of *Escherichia coli* during solar and photocatalytic disinfection in LDPE bags. **Chemosphere**, v. 85, n. 7, p.1160-1166, 2011.

EAWAG/SANDEC. **SODIS Solar Water Disinfection: A guide for the application of SODIS**. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute For Environmental Science And Technology, 2002. 188 p.

FISHER, M. B. et al. Speeding up solar disinfection (SODIS): effect of hydrogen peroxide, temperature, pH and copper plus ascorbate on the photoinactivation of *E. coli*. **Journal Of Water And Health**, v. 6, n. 1, p.35-51, 2008.

GONÇALVES, R. F.; JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A. Introdução. In: Rede Cooperativa de Pesquisas, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas: Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia**. Rio de Janeiro: Abes, 2003a. p. 1-26.

GONÇALVES, R. F. et al. Desinfecção por radiação ultravioleta. In: Rede Cooperativa de Pesquisas, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Desinfecção de**

efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias

nocivas: Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia. Rio de Janeiro: Abes, 2003b. p. 209-275.

HEASELGRAVE, W. et al. Solar disinfection of poliovirus and *Acanthamoeba polyphaga* cysts in water: a laboratory study using simulated sunlight. **Letters in Applied Microbiology**, v. 43, n. 2, p.125-130, 2006

HEASELGRAVE, W; KILVINGTON, S. The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against *Ascaris*, *Giardia*, *Acanthamoeba*, *Naegleria*, *Entamoeba* and *Cryptosporidium*. **Acta Tropica**, v. 119, n. 2-3, p.138-143, 2011.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 63, n. 22, p.131-158, 2008.

HIJNEN, W. A. M.; BEERENDONK, E. F.; MEDEMA, G. J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cycts in water: a review. **Water Research**, v. 40, n. 1, p.3-22, 2006.

IRÉNIKATCHÉ AKPONIKPÈ, P. B. et al. Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks. **Agricultural Water Management**, v. 98, p.834-840, 2011.

JIMÉNEZ, B. Irrigation in developing countries using wastewater. **International Review for Environmental Strategies**, v. 6, n. 2, p.229–50, 2006.

JIMÉNEZ, B. et al. Wastewater, Sludge and Excreta Use in Developing Countries: An Overview. In: DRECHSEL, P. et al. (Org.). **Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries**. London: Earthscan, 2010. p. 1-27.

JOYCE, T. M. et al. Inactivation of Fecal Bacteria in Drinking Water by Solar Heating. **And Environmental Microbiology**, v. 62, n. 2, p.399-402, 1996.

JUNGFER, C.; SCHWARTZ, T.; OBST, U. UV-induced dark repair mechanisms in bacteria associated with drinking water. **Water Research**, v. 41, n. 1, p.188-196, 2007.

KEHOE, S. C. et al. Effect of Agitation, Turbidity, Aluminium Foil Reflectors and Container Volume on the Inactivation Efficiency of batch-process solar disinfectors. **Water Research**, v. 35, n. 4, p.1061-1065, 2001.

KEHOE, S. C. et al. Batch process solar disinfection is an efficient means of disinfecting drinking water contaminated with *Shigella dysenteriae* type I. **Letters In Applied Microbiology**, v. 38, n. 5, p.410-414, 2004.

KERAITA, B.; JIMÉNEZ, B.; DRECHSEL, P. Extent and implications of agricultural reuse of untreated, partly treated and diluted wastewater in developing countries. **Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources**, v. 3, n. 58, p.1-15. 2008.

MALATO, S. et al. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. **Catalysis Today**, v. 147, n. 1, p.1-59, 2009.

MEIERHOFER, R.; LANDOLT, G. Factors supporting the sustained use of solar water disinfection: Experiences from a global promotion and dissemination programme. **Desalination**, v. 248, n. 1, p.144-151, 2009.

MONCAYO-LASSO, A. et al. Simultaneous E. coli Inactivation and MON oxidation in river water via photo-Fenton process at natural pH in solar CPC reactor: A new way for enhancing solar disinfection of natural water. **Chemosphere**, v. 77, n. 2, p.296-300, 2009.

MUYEN, Z.; MOORE, G. A.; WRIGLEY, R. J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. **Agricultural Water Management**, v. 99, n. 1, p.33-41, 2011

OATES, P. M. **Solar disinfection for point of use water treatment in haiti**. 2001. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Department Of Civil And Environmental Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2001.

OGUMA, K. et al. Determination of pyrimidine dimers in Escherichia coli and Cryptosporidium parvum during UV light inactivation, photoreactivation, and dark repair. **Applied And Environmental Microbiology**, v. 67, n. 10, p.4630-4637, 2001.

OMS – Organização Mundial de Saúde. **Wastewater Use in Agriculture**. Genebra: World Health Organization, 2006. (Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater).

PEDRERO, F. et al. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture: review of some practices in Spain and Greece. **Agricultural Water Management**, v. 97, p.1233-1241, 2010.

PONTIS, F.W. **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**. 4. ed. New York, Ny, Usa: Mcgraw-hill Professional, 1990

QADIR, M.; SCOTT, C. A. Non-Pathogenic Trade-Offs of Wastewater Irrigation. In: DRECHSEL, P. et al. (Org.). **Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries**. London: Earthscan, 2010. p. 101-126.

QADIR, M. et al. Agricultural use of marginal-quality water: opportunities and challenges. In: MOLDEN, D. (Org.). **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. London: Earthscan, 2007. p. 425-457.

RASCHID-SALLY, L.; JAYAKODY, P. **Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: Results from a global assessment**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2008. (Research Report 127)

REED, R. H. Solar inactivation of fecal bacteria in water: The critical role of Oxygen. **Letters In Applied Microbiology**, v. 24, p.276-280, 1997.

REGLI, S. Disinfection requirements to control for microbial contamination. In: GILBERT, C. E.; CALABRESE, E. J. (Org.). **Regulating Drinking Water Quality**. Mich, USA: Lewis, 1992.

ROJAS-VALENCIA, M. N.; ORTA DE VELÁSQUEZ, M. T.; VÍCTOR FRANCO. Urban agriculture, using sustainable practices that involve the reuse of wastewater and solid waste. **Agricultural Water Management**, v. 98, p.1388-1394, 2011.

ROJKO, C. **Solar disinfection of drinking water**. 2003. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, USA, 2003.

RYER, A. D. **Light measurement handbook**. Newburyport: International Light Inc, 1997. 64 p. (Technical Publications).

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. et al. Domestic wastewater disinfection using solar radiation for agricultural reuse. **Transactions Of The Asabe**, v. 50, n. 1, p.65-71, 2007.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. et al. Potential use of solar radiation to disinfect domestic wastewater in Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas (UNICAMP)**, v. 2, n. 3, p.283-294, 2008.

SCHEIERLING, S. M., et al. **Improving Wastewater Use in Agriculture: An Emerging Priority**. Washington, DC: Banco Mundial, 2010. (Policy Research Working Paper 5412).

SCIACCA, F. et al. Dramatic enhancement of solar disinfection (SODIS) of wild Salmonella sp. In PET bottles by H₂O₂ addition on natural water of Burkina Faso containing dissolved iron. **Chemosphere**, v. 78, n. 9, p.1186-1191, 2010.

SINGH, P. K.; DESHBHRATAR, P.B.; RAMTEKE, D. S. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. **Agricultural Water Management**, v. 103, p.100-104, 2012.

SOLARTE, Y. et al. Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del Vibrio cholerae en agua para consumo humano: Factores que condicionan la eficiencia del proceso. **Colombia Médica**, v. 28, n. 3, p.123-129, 1997

TCHOBANOGLIOUS, G. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. 2. ed. Boston: Mcgraw-hill Professional, 1979. 920 p. (METCALF & EDDY INC.).

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. 4. ed. Boston: Mcgraw-hill Professional, 2003. 1819 p. (METCALF & EDDY INC.).

TIWARI, K. K. et al. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, v. 74, n. 6, p.1670-1677, 2011.

TOSA, K.; HIRATA, T. Photoreactivation of enterohemorrhagic Escherichia coli following UV disinfection. **Water Research**, v. 33, n. 2, p.361-366, 1999.

UBOMBA-JASWA, E. et al. Investigating the microbial inactivation efficiency of a 25 L batch solar disinfection (SODIS) reactor enhanced with a compound parabolic collector (CPC) for Household Use. **Journal Of Chemical Technology And Biotechnology**, v. 85, n. 8, p.1028-1037, 2010.

USEPA – U. S. Environmental Protection Agency. **Wastewater technology fact sheet: ultraviolet disinfection**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1999. (EPA/832/F-99/064).

USEPA – U. S. Environmental Protection Agency. **Ultraviolet Disinfection Guidance Manual: DRAFT**, 478. Washington-dc: United States Environmental Protection Agency, 2003. (4601/ 815-D-03-007).

VON SPERLING, M. et al. Lagoas de estabilização. In: Rede Cooperativa de Pesquisas, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas: Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia**. Rio de Janeiro: Abes, 2003. p. 276-336.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions**. London, Uk: Iwa Publishing, 2005.

VON SONNTAG, C. et al. The photochemical basis of UV disinfection. In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN CONFERENCE ON UV RADIATION - EFFECTS AND TECHNOLOGIES, 2004, Karlsruhe. **Proceedings...** Karlsruhe: European Conference On Uv Radiation, 2004. p. 22 - 24.

WEF – Water Environment Federation. **Wastewater disinfection: manual of practice** FD-10. Alexandria: WEF, 1996. 299 p.

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.154-169, 1994

APÊNDICE 1

Tabela 12 – Dados originais

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
1	Controle	0	0	0	4611000	4611000	1	0	21	600	158	6,11
1	Controle	5	11,9285079	0,529919459	1553070	4611000	0,336818	0,472604	27,9	604	144	6,4
1	Controle	10	20,3696987	0,911778725	76300	4611000	0,016547	1,781271	25,5	487	119	7,07
1	Controle	24	20,8972166	0,936920755	285100	4611000	0,06183	1,208798	17	411	106	7,53
1	Controle	29	33,0435151	1,489634824	116600	4611000	0,025287	1,597097	28,3	375	96	7,62
1	Controle	34	41,6000144	1,879061617	74800	4611000	0,016222	1,789894	25	297	102	7,99
1	Controle	48	42,1460402	1,90474732	85200	4611000	0,018478	1,733356	15,4	298	102	7,91
1	Controle	53	54,4197848	2,449573887	62200	4611000	0,013489	1,870005	28,2	270	107	7,94
1	Controle	58	62,5679914	2,817015917	21400	4611000	0,004641	2,333381	25	283	100	7,98
1	Branco	0	0	0	2904000	2904000	1	0	20,5	620	161	6,09
1	Branco	5	11,9285079	0,529919459	1732870	2904000	0,596718	0,224231	26,7	538	135	6,4
1	Branco	10	20,3696987	0,911778725	124600	2904000	0,042906	1,367479	23,6	519	119	7,06
1	Branco	24	20,8972166	0,936920755	298700	2904000	0,102858	0,987761	15,8	462	112	7,31
1	Branco	29	33,0435151	1,489634824	122200	2904000	0,04208	1,375925	26,5	418	105	7,37
1	Branco	34	41,6000144	1,879061617	123300	2904000	0,042459	1,372034	23,3	389	95	7,66
1	Branco	48	42,1460402	1,90474732	93300	2904000	0,032128	1,493115	13,9	377	103	7,66
1	Branco	53	54,4197848	2,449573887	45000	2904000	0,015496	1,809784	26,5	378	104	7,78
1	Branco	58	62,5679914	2,817015917	25700	2904000	0,00885	2,053064	23,5	367	111	8,15
1	Preto	0	0	0	1918000	1918000	1	0	21,6	635	169	6,18
1	Preto	5	11,9285079	0,529919459	770100	1918000	0,401512	0,396301	30,2	538	129	6,5

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
1	Preto	10	20,3696987	0,911778725	88400	1918000	0,04609	1,336396	26,5	559	118	7,01
1	Preto	24	20,8972166	0,936920755	218700	1918000	0,114025	0,943	17,7	455	117	7,38
1	Preto	29	33,0435151	1,489634824	135400	1918000	0,070594	1,15123	28,7	400	109	7,43
1	Preto	34	41,6000144	1,879061617	82300	1918000	0,042909	1,367449	25,8	340	102	7,71
1	Preto	48	42,1460402	1,90474732	68900	1918000	0,035923	1,444629	15,8	318	117	7,76
1	Preto	53	54,4197848	2,449573887	48100	1918000	0,025078	1,600704	29,2	299	114	7,7
1	Preto	58	62,5679914	2,817015917	17100	1918000	0,008916	2,049852	25,8	280	108	7,83
2	Controle	0	0	0	959000	959000	1	0	23,5	590	204	6,04
2	Controle	5	9,62053085	0,512748464	85500	959000	0,089155	1,049852	31,2	554	108	6,63
2	Controle	10	16,6425108	0,87980256	55600	959000	0,057977	1,236744	28,4	558	124	7,17
2	Controle	24	17,0291105	0,901688217	79800	959000	0,083212	1,079816	22,3	438	123	7,61
2	Controle	29	20,7561263	1,134358886	39900	959000	0,041606	1,380846	26,2	338	104	7,65
2	Controle	34	25,2002583	1,38386925	19900	959000	0,020751	1,682966	26,3	338	94	7,71
2	Controle	48	26,044132	1,422273213	18700	959000	0,019499	1,709977	20,7	248	108	7,67
2	Controle	53	34,0327834	1,853351846	3100	959000	0,003233	2,490457	29	248	88	7,73
2	Controle	58	41,5435868	2,246687703	300	959000	0,000313	3,504697	27,5	233	74	7,71
2	Branco	0	0	0	670000	670000	1	0	22,9	570	204	6,03
2	Branco	5	9,62053085	0,512748464	90700	670000	0,135373	0,868468	30	514	116	6,54
2	Branco	10	16,6425108	0,87980256	48800	670000	0,072836	1,137655	27,3	558	108	7,14
2	Branco	24	17,0291105	0,901688217	93000	670000	0,138806	0,857592	21,3	477	117	7,42
2	Branco	29	20,7561263	1,134358886	40800	670000	0,060896	1,215415	25	351	104	7,39
2	Branco	34	25,2002583	1,38386925	45200	670000	0,067463	1,170936	25	305	98	7,49
2	Branco	48	26,044132	1,422273213	32700	670000	0,048806	1,311527	19,9	275	102	7,47

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
2	Branco	53	34,0327834	1,853351846	14500	670000	0,021642	1,664707	27,6	296	103	7,47
2	Branco	58	41,5435868	2,246687703	830	670000	0,001239	2,906997	26,5	355	96	7,52
2	Preto	0	0	0	546000	546000	1	0	24	781	170	6,07
2	Preto	5	9,62053085	0,512748464	81600	546000	0,149451	0,825502	32,4	533	115	6,61
2	Preto	10	16,6425108	0,87980256	27800	546000	0,050916	1,293148	29,3	571	113	7,2
2	Preto	24	17,0291105	0,901688217	83600	546000	0,153114	0,814986	23,1	471	153	7,54
2	Preto	29	20,7561263	1,134358886	41300	546000	0,075641	1,121243	26,8	350	114	7,42
2	Preto	34	25,2002583	1,38386925	30900	546000	0,056593	1,247234	26,9	287	104	7,55
2	Preto	48	26,044132	1,422273213	33200	546000	0,060806	1,216055	21,4	290	114	7,38
2	Preto	53	34,0327834	1,853351846	7400	546000	0,013553	1,867961	29,7	259	58	7,5
2	Preto	58	41,5435868	2,246687703	1000	546000	0,001832	2,737193	28,3	313	98	7,53
3	Controle	0	0	0	1631000	1631000	1	0	21,4	683	206	6,12
3	Controle	5	11,9243759	0,530451805	397000	1631000	0,243409	0,613663	27,7	563	145	6,38
3	Controle	10	19,6679914	0,888178517	13300	1631000	0,008155	2,088602	25,2	520	128	7,03
3	Controle	24	20,1613773	0,912057641	43100	1631000	0,026426	1,577977	16,4	486	122	7,4
3	Controle	29	32,0537733	1,452217684	80500	1631000	0,049356	1,306658	27,6	436	117	7,44
3	Controle	34	40,0353659	1,828551027	30900	1631000	0,018945	1,722495	24,7	360	120	7,93
3	Controle	48	40,5624534	1,853282471	4640	1631000	0,002845	2,545936	15,6	315	111	7,88
3	Controle	53	52,7532999	2,402782641	41300	1631000	0,025322	1,596504	27,7	313	115	7,97
3	Controle	58	60,708637	2,773982242	710	1631000	0,000435	3,361195	23,9	288	96	7,95
3	Branco	0	0	0	1320000	1320000	1	0	20,7	641	182	6,08
3	Branco	5	11,9243759	0,530451805	269000	1320000	0,203788	0,690822	26,6	583	136	6,33
3	Branco	10	19,6679914	0,888178517	10200	1320000	0,007727	2,111974	23,8	523	118	6,94
3	Branco	24	20,1613773	0,912057641	34600	1320000	0,026212	1,581498	15,4	500	116	7,34

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
3	Branco	29	32,0537733	1,452217684	47500	1320000	0,035985	1,44388	26,5	454	110	7,38
3	Branco	34	40,0353659	1,828551027	9500	1320000	0,007197	2,14285	22,7	405	106	7,62
3	Branco	48	40,5624534	1,8533282471	4990	1320000	0,00378	2,422473	14,6	359	114	7,68
3	Branco	53	52,7532999	2,402782641	22100	1320000	0,016742	1,776182	26,7	316	112	7,75
3	Branco	58	60,708637	2,773982242	1240	1320000	0,000939	3,027152	21,8	304	118	7,84
3	Preto	0	0	0	1391000	1391000	1	0	21,8	607	173	6,07
3	Preto	5	11,9243759	0,530451805	386000	1391000	0,277498	0,55674	29,5	627	134	5,22
3	Preto	10	19,6679914	0,888178517	8200	1391000	0,005895	2,229513	26,5	516	118	6,86
3	Preto	24	20,1613773	0,912057641	31200	1391000	0,02243	1,649173	17	480	117	7,35
3	Preto	29	32,0537733	1,452217684	60500	1391000	0,043494	1,361572	28,6	520	107	7,3
3	Preto	34	40,0353659	1,828551027	13200	1391000	0,00949	2,022753	25,4	396	108	7,58
3	Preto	48	40,5624534	1,8533282471	6050	1391000	0,004349	2,361572	16,1	394	120	7,74
3	Preto	53	52,7532999	2,402782641	10500	1391000	0,007549	2,122138	28,7	315	115	7,73
3	Preto	58	60,708637	2,773982242	1030	1391000	0,00074	3,13049	24,5	313	124	7,82
4	Controle	0	0	0	1050000	1050000	1	0	20,6	674	176	6,16
4	Controle	5	11,2685079	0,519857267	128000	1050000	0,121905	0,913979	26,6	582	150	6,16
4	Controle	10	18,4817217	0,862141693	95900	1050000	0,091333	1,039371	23,4	524	127	6,86
4	Controle	24	18,7987231	0,879706285	95800	1050000	0,091238	1,039824	16,2	371	117	7,21
4	Controle	29	27,9877188	1,335589984	27500	1050000	0,02619	1,581857	24,5	317	114	7,23
4	Controle	34	35,4476471	1,688745032	20200	1050000	0,019238	1,715838	23,8	283	108	7,52
4	Controle	48	36,0191535	1,710725548	106300	1050000	0,101238	0,994656	17	387	115	7,67
4	Controle	53	48,2920803	2,266441143	10500	1050000	0,01	2	28,5	319	111	7,84
4	Controle	58	55,7356098	2,611744085	9140	1050000	0,008705	2,060243	25	290	93	7,95

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
4	Branco	0	0	0	1287000	1287000	1	0	20,7	640	169	6,11
4	Branco	5	11,2685079	0,519857267	177000	1287000	0,137529	0,861605	25,6	583	146	6,19
4	Branco	10	18,4817217	0,862141693	59800	1287000	0,046465	1,332877	21,5	509	125	6,92
4	Branco	24	18,7987231	0,879706285	84200	1287000	0,065423	1,184266	15,2	414	114	7,06
4	Branco	29	27,9877188	1,335589984	25400	1287000	0,019736	1,704745	24	312	111	7,14
4	Branco	34	35,4476471	1,688745032	7410	1287000	0,005758	2,23976	21,9	313	102	7,37
4	Branco	48	36,0191535	1,710725548	19900	1287000	0,015462	1,810725	16,1	355	111	7,54
4	Branco	53	48,2920803	2,266441143	8100	1287000	0,006294	2,201094	27	328	101	7,63
4	Branco	58	55,7356098	2,611744085	3910	1287000	0,003038	2,517402	23,1	328	96	7,87
4	Preto	0	0	0	1483000	1483000	1	0	20,6	665	164	6,06
4	Preto	5	11,2685079	0,519857267	163000	1483000	0,109912	0,958954	28,1	553	140	6,25
4	Preto	10	18,4817217	0,862141693	70000	1483000	0,047202	1,326043	24,2	515	119	6,86
4	Preto	24	18,7987231	0,879706285	78000	1483000	0,052596	1,279047	16,6	366	110	7,15
4	Preto	29	27,9877188	1,335589984	20400	1483000	0,013756	1,861511	26	313	108	7,15
4	Preto	34	35,4476471	1,688745032	14100	1483000	0,009508	2,021922	24,3	261	102	7,39
4	Preto	48	36,0191535	1,710725548	40500	1483000	0,02731	1,563686	17,8	351	116	7,6
4	Preto	53	48,2920803	2,266441143	8400	1483000	0,005664	2,246862	29,4	321	104	7,59
4	Preto	58	55,7356098	2,611744085	9820	1483000	0,006622	2,17903	25,6	262	100	7,79
5	Controle	0	0	0	132000	132000	1	0	24,5	815	163	5,93
5	Controle	5	12,766571	0,608040675	35400	132000	0,268182	0,571571	34,6	686	107	6,63
5	Controle	10	21,1312339	1,023156661	12000	132000	0,090909	1,041393	31	668	115	7,08
5	Branco	0	0	0	272000	272000	1	0	22,8	764	149	6,06
5	Branco	5	12,766571	0,608040675	41600	272000	0,152941	0,815476	31,5	691	115	6,3

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	PH
5	Branco	10	21,1312339	1,023156661	6200	272000	0,022794	1,642177	28,5	651	119	6,98
5	Preto	0	0	0	201000	201000	1	0	24,9	772	146	6,04
5	Preto	5	12,766571	0,608040675	24000	201000	0,119403	0,922985	36,2	676	108	6,44
5	Preto	10	21,1312339	1,023156661	4100	201000	0,020398	1,690412	31,9	716	114	6,96
6	Controle	0	0	0	259000	259000	1	0	24	822	197	6,2
6	Controle	5	5,72414634	0,330887121	146700	259000	0,566409	0,24687	26,1	709	156	6,58
6	Controle	10	11,0488235	0,614743723	91100	259000	0,351737	0,453781	26,2	646	154	6,94
6	Controle	24	11,5113056	0,640474732	101400	259000	0,391506	0,407262	20,4	642	150	7,53
6	Controle	29	23,3681062	1,233472964	72800	259000	0,281081	0,551168	30,7	637	131	7,53
6	Branco	0	0	0	419000	419000	1	0	22,9	839	192	6,14
6	Branco	5	5,72414634	0,330887121	307600	419000	0,734129	0,134228	24,8	728	158	6,38
6	Branco	10	11,0488235	0,614743723	49600	419000	0,118377	0,926732	24,8	772	130	6,84
6	Branco	24	11,5113056	0,640474732	104300	419000	0,248926	0,60393	19,2	654	147	7,27
6	Branco	29	23,3681062	1,233472964	47900	419000	0,11432	0,941879	29,8	744	157	7,36
6	Preto	0	0	0	313000	313000	1	0	24	850	219	6,2
6	Preto	5	5,72414634	0,330887121	178000	313000	0,56869	0,245124	26,9	774	165	6,51
6	Preto	10	11,0488235	0,614743723	55100	313000	0,176038	0,754393	26,7	657	153	6,89
6	Preto	24	11,5113056	0,640474732	83300	313000	0,266134	0,574899	20,8	691	152	7,32
6	Preto	29	23,3681062	1,233472964	55600	313000	0,177636	0,75047	32,1	713	151	7,44
7	Controle	0	0	0	1493000	1493000	1	0	21,4	468	188	6,17
7	Controle	2	3,2484792	0,152032968	1014000	1493000	0,679169	0,168022	23	468	188	7,26
7	Controle	3	5,85835007	0,264673735	959000	1493000	0,642331	0,192241	24,3	468	188	7,56
7	Controle	4	9,07037303	0,405445316	527000	1493000	0,352981	0,452249	25,4	468	188	7,36
7	Branco	0	0	0	2987000	2987000	1	0	21,4	519	179	6,19

Tabela 12 – Dados originais (continuação)

Repetição	Tratamento	Tempo (h)	RG (MJ/m ²)	RUV (MJ/m ²)	N	No	y (N/No)	Log (1/y)	T (°C)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH
7	Branco	4	9,07037303	0,405445316	530000	2987000	0,177436	0,750959	25,4	519	179	6,76
7	Preto	0	0	0	1585000	1585000	1	0	22,2	498	160	6,19
7	Preto	1	1,25156385	0,05965675	1515000	1585000	0,955836	0,019617	22	498	160	6,92
7	Preto	4	9,07037303	0,405445316	481000	1585000	0,30347	0,517884	28,4	498	160	7,69
8	Controle	0	0	0	1036000	1036000	1	0	25,3	560	200	6,71
8	Controle	1	2,71200861	0,126181615	867000	1036000	0,836873	0,077341	27,7	560	200	6,6
8	Controle	2	5,24621234	0,246613608	728000	1036000	0,702703	0,153228	29,5	560	200	6,81
8	Controle	3	7,38809182	0,351784539	638000	1036000	0,61583	0,210539	29,7	560	200	7,46
8	Controle	4	8,66246772	0,416770414	545000	1036000	0,526062	0,278963	29,9	560	200	7,36
8	Branco	0	0	0	1162000	1162000	1	0	22,9	546	190	6,58
8	Branco	2	5,24621234	0,246613608	687000	1162000	0,591222	0,228249	27,5	546	190	7,15
8	Branco	3	7,38809182	0,351784539	488000	1162000	0,419966	0,376786	27,4	546	190	7,29
8	Branco	4	8,66246772	0,416770414	265000	1162000	0,228055	0,64196	27,2	546	190	7,61
8	Preto	0	0	0	1259000	1259000	1	0	24,5	560	209	6,63
8	Preto	1	2,71200861	0,126181615	958000	1259000	0,760921	0,11866	27,9	560	209	7
8	Preto	2	5,24621234	0,246613608	763000	1259000	0,606037	0,217501	31,5	560	209	7,21
8	Preto	3	7,38809182	0,351784539	689000	1259000	0,54726	0,261807	31	560	209	7,32
8	Preto	4	8,66246772	0,416770414	332000	1259000	0,263701	0,578888	30,4	560	209	7,28

Tempo – tempo de residência (h); RG – Radiação solar global (MJ m⁻²); RUV – Radiação UV (MJ m⁻²); N – População remanescente de *E. coli* (NMP/100 mL); No – População inicial de *E. coli* (NMP/100 mL); y – razão N/No; Log – Redução logarítmica (log(1/y)); T – Temperatura (°C); SST – Sólidos suspensos totais (mg L⁻¹); DQO – Demanda química de oxigênio (mg L⁻¹); pH – Potencial hidrogeniônico.

APÊNDICE 2

Script utilizado para a análise estatística dos dados no software estatístico R (versão: 3.0.1).

```
#LEITURA E PREPARAÇÃO DOS DADOS
(dados <- read.csv('dados.csv',sep=';',dec=','))
dados$ID <- factor(dados$ID)
attach(dados)
names(dados)
library(MASS)
library(lme4)

# PLOTAR DOS DADOS
plot(RG,y,xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y (N/No)',col=TRAT)
plot(RG,log)

# MODELOS COM TRATAMENTO
mod1 <- glmer(cbind(N,No-N)~TRAT+RG+(1|ID),family=binomial,data=dados)
summary(mod1)
px <- seq(0,70,by=0.1)
mb <- (exp(1.936-0.2321*px))/(1+(exp(1.936-0.2321*px)))
mc <- (exp(2.1111-0.2321*px))/(1+(exp(2.1111-0.2321*px)))
mp <- (exp(2.00396-0.2321*px))/(1+(exp(2.00396-0.2321*px)))
par(mfrow=c(3,1))
plot(RG[TRAT=='Branco'],y[TRAT=='Branco'],xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y
(N/No)',main='Reator branco')
lines(px,mb,col=1)
plot(RG[TRAT=='Controle'],y[TRAT=='Controle'],xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y
(N/No)',main='Reator controle')
lines(px,mc,col=2)
plot(RG[TRAT=='Preto'],y[TRAT=='Preto'],xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y
(N/No)',main='Reator preto')
lines(px,mp,col=3)
plot(RG,y,xlab='Dose(MJ/m2)', ylab='y (N/No)')
lines(px,mb,col=1)
lines(px,mc,col=2)
lines(px,mp,col=3)
summary(mod1)

#MODELO SEM TRATAMENTO
mod2 <- glmer(cbind(N,No-N)~RG+(1|ID),family=binomial,data=dados)
summary(mod2)
anova(mod1,mod2)
mod <- (exp(2.017-0.2321*px))/(1+(exp(2.017-0.2321*px)))
plot(RG,y,xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y (N/No)')
lines(px,mod,col=1)
```

```
#MODELO SEM TRATAMENTO X MODELO SANCHEZ-ROMAN
modSR <- (exp(1.6774-0.321*px))/(1+(exp(1.6774-0.321*px)))
plot(RG,y,xlab='Dose (MJ/m2)', ylab='y (N/No)')
lines(px,mod,col=1)
lines(px,modSR,col=2)
```

```
#RESIDUOS E NORMALIDADE MODELO SEM TRATAMENTO
par(mfrow=c(2,1))
plot(fitted(mod2),residuals(mod2),xlab='Modelo ajustado',
ylab='Resíduos',main='Distribuição dos resíduos')
qqnorm(residuals(mod2),xlab='Quantis teóricos', ylab='Quantis da
amostra',main='Normalidade')
```

```
#MODELOS LINEARES
plot(RG,log,xlab='Dose(MJ/m2)', ylab='Log')
mod3 <- lm(log~RUV+RG+FUV+t+SST+DQO+PH,data=dados)
mod4 <- lm(log~RUV+RG+FUV+t+SST+DQO,data=dados)
mod5 <- lm(log~RUV+RG+FUV+t+SST,data=dados)
mod6 <- lm(log~RUV+RG+FUV+SST+DQO,data=dados)
mod7 <- lm(log~RUV+RG+FUV+SST,data=dados)
mod8 <- lm(log~RUV+RG+FUV+t,data=dados)
mod9 <- lm(log~RUV+RG+SST,data=dados)
mod10 <- lm(log~FUV+RG+SST,data=dados)
mod11 <- lm(log~RG+SST,data=dados)
mod12 <- lm(log~RUV+SST,data=dados)
mod13 <- lm(log~RG,data=dados)
mod14 <- lm(log~RUV,data=dados)
```

```
AIC(mod3,mod4,mod5,mod6,mod7,mod8,mod9,mod10,mod11,mod12,mod13,mod14)
BIC(mod3,mod4,mod5,mod6,mod7,mod8,mod9,mod10,mod11,mod12,mod13,mod14)
```

```
#MODELO LINEAR COMPLETO
modl <- lm(log~TRAT+RUV+RG+FUV+t+SST+DQO+PH,data=dados)
summary(modl)
```

```
#PLOTAR MODELO 12
puv <- seq(0,3,by=0.1)
modf50 <- (1/(10^(0.930141+0.703179*puv)))
modf100 <- (1/(10^(0.605541+0.703179*puv)))
modf125 <- (1/(10^(0.443241+0.703179*puv)))
modf150 <- (1/(10^(0.280941+0.703179*puv)))
modf175 <- (1/(10^(0.118641+0.703179*puv)))
modf200 <- (1/(10^(0.703179*puv-0.043659)))
plot(RUV,y,xlab='Dose UV (MJ/m2)', ylab='y (N/No)')
lines(puv,modf50,col=1)
lines(puv,modf100,col=2)
lines(puv,modf125,col=3)
lines(puv,modf150,col=4)
lines(puv,modf175,col=5)
```

```
lines(puv,modf200,col=6)
```

```
#RESIDUOS E NORMALIDADE MODELO 12
```

```
par(mfrow=c(2,1))
```

```
plot(fitted(mod12),residuals(mod12),xlab='Modelo ajustado',
```

```
ylab='Resíduos',main='Distribuição dos resíduos')
```

```
qqnorm(residuals(mod12),xlab='Quantis teóricos', ylab='Quantis da  
amostra',main='Normalidade')
```

```
#PLOTAR SUPERFÍCIE
```

```
(super <- read.csv('superficie.csv',sep=';',dec=','))
```

```
library(lattice)
```

```
trellis.par.set("axis.line",list(col="transparent"))
```

```
(fig1 <- wireframe(y ~ RUV * SST,data = super, scales = list(arrows=FALSE,cex= 1,  
col = "black",font = 3), colorkey = FALSE,screen =list(z = -40, x = -70),xlab = 'Dose  
UV (MJ/m2)',ylab = 'SST (mg/L)',zlab = "y (N/No)",zlim = range(seq(0.0,  
1.11,by=0.01)),shade=TRUE,shade.colors = function(irr, ref, height, w = 0.5) grey(w *  
irr + (1 - w) * (1 - (1 - ref)^0.4))))
```