

Agrupamento de variáveis meteorológicas e qualitativas de água cinza em reator solar*

Clustering of meteorological and qualitative variables of graywater in a solar reactor

Fernanda Lima Cavalcante¹, Joel Medeiros Bezerra², João Gabriel Thomaz Queluz³, Rodrigo Máximo Sánchez-Román⁴, Solange Aparecida Goularte Dombroski⁵, Rafael Oliveira Batista⁵

RESUMO: O saneamento ambiental inadequado contribui para a poluição da água dos mananciais, bem como o surgimento de casos de doenças de veiculação hídrica. No entanto, a radiação solar é uma alternativa de baixo custo, fácil operação e efetiva para desinfecção de águas cinza. Objetivou-se, com o presente trabalho, identificar os agrupamentos de variáveis meteorológicas e qualitativas de amostras de águas cinza tratadas em reator solar no semiárido potiguar. Para isso, utilizou-se uma estação de tratamento de águas cinza composta por tanque séptico, filtro anaeróbio e reator solar. Os testes foram realizados de julho a dezembro de 2015, mensalmente. No reator solar foram mantidas lâminas de águas cinza de 0,1 m, que ficaram expostas à radiação solar das 8h às 16h, sendo coletadas alíquotas a cada duas horas. As amostras coletadas foram submetidas às análises de pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica, sólidos suspensos totais, turbidez, coliformes totais, *E. coli* e ovos de helmintos. Foram monitoradas, também, as variáveis: temperatura do ar e radiação solar global. Os dados obtidos foram submetidos à análise de agrupamento hierárquico que resultou na formação de quatro grupos, demonstrando que o agrupamento ocorreu em função da sazonalidade, e do tempo de exposição solar ao qual as amostras de águas cinza foram submetidas. A desinfecção solar configura-se como uma alternativa viável, técnica e economicamente, que permite redução significativa de patógenos, possibilitando o uso agrícola de água cinza.

Palavras-chave: Água residuária. Bactérias. Decaimento. Reator.

ABSTRACT: Inadequate environmental sanitation contributes to the pollution of water sources, as well as the emergence of cases of water-borne diseases. However, solar radiation is a low-cost, easy-to-operate and effective alternative for greywater disinfection. The objective of this study was to identify the groupings of meteorological and qualitative variables of samples of graywater treated in a solar reactor in the semi-arid region of Rio Grande do Norte. For this, a greywater treatment plant consisting of a septic tank, anaerobic filter and solar reactor was used. Tests were performed from July to December 2015, monthly. In the solar reactor, 0.1 m greywater sheets were kept, which were exposed to solar radiation from 8 am to 4 pm, and aliquots were collected every two hours. The collected samples were submitted to pH, dissolved oxygen, temperature, electrical conductivity, total suspended solids, turbidity, total coliforms, *E. coli*, and helminth eggs analyses. The following variables were also monitored: air temperature and global solar radiation. The data obtained were submitted to hierarchical clustering analysis that resulted in the formation of four groups, demonstrating that the clustering occurred as a function of seasonality, and the time of sun exposure to which the graywater samples were submitted. Solar disinfection is a technically and economically viable alternative that allows a significant reduction in pathogens, enabling the agricultural use of graywater.

Keywords: Bacteria. Decay. Reactor. Wastewater.

Autor correspondente:

Rafael Oliveira Batista: rafaelbatista@ufersa.edu.br

Recebido em: 05/01/2020

Aceito em: 17/11/2020

INTRODUÇÃO

O saneamento ambiental inadequado acarreta tanto a poluição e contaminação das águas dos mananciais, utilizadas nos sistemas de abastecimento público, quanto o surgimento de casos de doenças de veiculação hídrica (PAIVA; SOUZA, 2018).

* Este trabalho é parte da tese de doutorado do primeiro autor.

² Docente do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), Mossoró (RN), Brasil.

³ Docente da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Pau dos Ferros (RN), Brasil.

⁴ 3 Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Botucatu (SP), Brasil.

⁵ 4 Docente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Botucatu (SP), Brasil.

⁶ 5 Docente da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró (RN), Brasil.

Em habitações, no meio rural, é bastante comum a segregação dos efluentes domésticos, sendo as fezes e a urina encaminhadas, normalmente, a uma fossa negra e o restante (águas cinza) disposto diretamente no solo, ou até mesmo utilizado para irrigação de culturas, levando a discussão a respeito de tecnologias de tratamento e uso desses efluentes (PIRES, 2012).

As águas cinza são definidas como águas residuárias domésticas, originadas nos chuveiros, banheiras, lavatórios, pias de cozinha e lavanderias (SHAMABADI *et al.*, 2015). Estas representam de 50 a 70% de toda a água consumida em domicílios, tendo 30% da fração orgânica e 9 a 20% de nutrientes, tornando-se, assim, uma boa alternativa para o uso agrícola (FOUNTOULAKIS *et al.*, 2016).

O grande potencial de reutilização das águas cinza pode ser atribuído ao seu baixo teor de poluentes, quando comparado às demais águas residuárias domésticas (MAY, 2008). No entanto, as águas cinza podem conter uma variedade de microrganismos prejudiciais, em que as espécies e nível populacional variam de acordo com o tipo de fonte, o tempo de armazenamento e o nível sanitário da população (BENAMI; GILLOR; GROSS, 2016).

Na desinfecção solar, a redução do nível populacional dos micro-organismos patogênicos ocorre pela ação conjunta da radiação ultravioleta e infravermelha provenientes do sol; assim, a radiação ultravioleta promove a modificação do DNA dos micro-organismos e a radiação infravermelha ocasiona o aquecimento da água para temperatura acima de 50 °C, tornando assim o meio incompatível ao desenvolvimento da maioria dos micro-organismos patogênicos (SODIS, 2002; SPUHLER; RENGIFO-HERRERA; PULGARIN, 2010; LOBO *et al.*, 2013).

As temperaturas elevadas, nos micro-organismos, além de causar diminuição nas funções enzimáticas, com a desnaturação das proteínas, acarretam, também, aumento da permeabilidade da membrana (MADIGAN; MARTINKO; PARKER, 2004).

Em um estudo realizado com águas residuárias sintética e sanitária, evidenciou-se, durante 180 minutos de irradiação solar, eficácia de desinfecção variando de 86,8 a 100% para as bactérias de veiculação hídrica *Escherichia coli*, espécies de *Salmonella*, espécies de *Shigella* e *Vibrio cholerae* (MECHA *et al.*, 2019).

A região mais apropriada para uso da radiação solar na desinfecção compreende a faixa de latitude entre 15°N e 15°S, principalmente em regiões semiáridas, que são caracterizadas por receber mais radiação solar, das quais 90% vêm como radiação direta, devido à baixa nebulosidade e baixa pluviosidade, inferior a 250 mm por ano, e geralmente mais de 3.000 horas de radiação solar por ano; portanto, a radiação solar nessas regiões é uma fonte constante de energia, que pode ser explorada a baixo custo para inúmeras aplicações, incluindo a desinfecção solar (SODIS, 2003).

Deve-se ressaltar que o sol é uma fonte natural e renovável de radiação eletromagnética, que incide na Terra em uma ampla faixa de comprimentos de onda; do incidente de radiação solar na superfície terrestre, 44% têm comprimento de onda na faixa entre 400 e 700 nm, chamada de radiação visível; a radiação solar restante é distribuída da seguinte forma: 7% de radiação UV (< 400 nm), 37% infravermelho próximo (700 a 1.500 nm) e 11% infravermelho (> 1.500 nm); e menos de 1% da radiação emitida está concentrada acima da região do infravermelho e abaixo da região do UV (MARCELINO *et al.*, 2015).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho identificar os agrupamentos de variáveis meteorológicas e qualitativas de amostras de águas cinza em reator solar no semiárido potiguar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO E USO AGRÍCOLA DE ÁGUAS CINZA E CLIMA DA REGIÃO

O sistema de tratamento e aproveitamento agrícola de águas cinza utilizado neste trabalho localiza-se em uma residência, do Projeto de Assentamento Monte Alegre I, sob as coordenadas geográficas 5°30'13,06"S e 37°27'23,27"O,

na cidade de Upanema (RN), microrregião Médio Oeste Potiguar. Essa residência é habitada por cinco pessoas e gera, em média, $0,55 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ de água cinza.

O clima da região é do tipo BSw_h, caracterizado como seco, muito quente e com estação chuvosa no verão retardando-se para o outono, tendo temperatura média do ar anual de $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$, precipitação pluviométrica bastante irregular, com média anual de $673,9 \text{ mm}$ e umidade relativa do ar média de $68,9\%$ (ALVARES *et al.*, 2013).

O sistema de tratamento e aproveitamento de águas cinza é composto por caixa de passagem, tanque séptico, filtro orgânico, reservatório e um sistema de irrigação por gotejamento destinado à fertirrigação de cultivos agrícolas, conforme esquema da Figura 1.

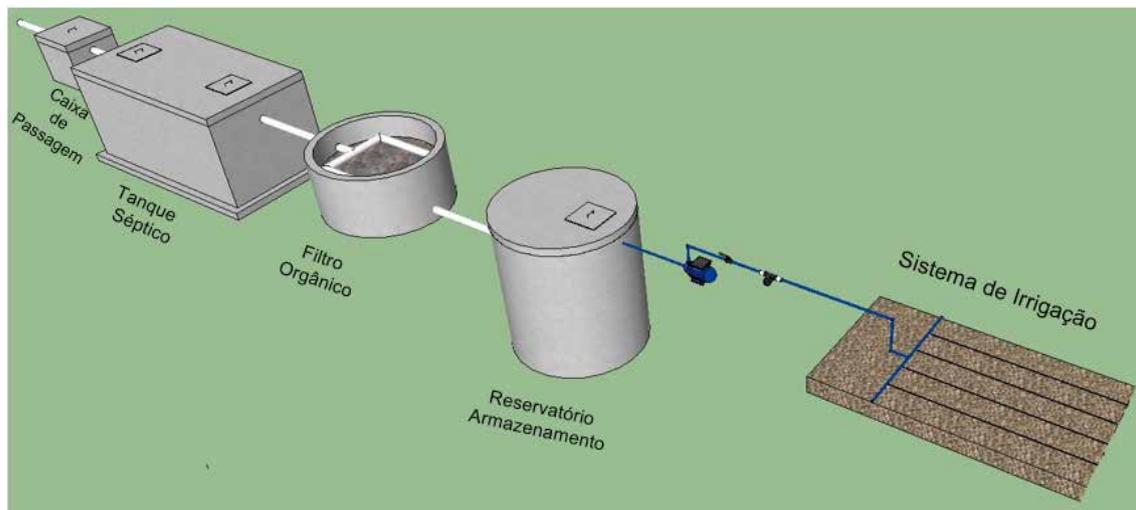


Figura 1. Componentes do sistema de tratamento de águas cinza.

Fonte: Cavalcante *et al.* (2018).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DESINFECÇÃO SOLAR

O sistema de desinfecção solar é composto por um reator solar construído à base de concreto ao nível do solo e fica localizado na área experimental do Centro de Multiplicação de Animais Silvestres (CEMAS) na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Mossoró (RN), sob as coordenadas geográficas $5^{\circ}21'28''\text{S}$ $37^{\circ}31'02''\text{O}$ e altitude de 39 m .

O reator solar foi construído e pintado na cor preta, seguindo as recomendações de Queluz e Sánchez-Román (2014), no formato de tronco cônico invertido tendo as dimensões de $1,00$, $0,25$ e $0,30 \text{ m}$ de raio maior, raio menor e altura, respectivamente, como evidenciado na Figura 2.



Figura 2. Imagem do reator solar pintado na cor preta.
Fonte: Autoria própria (2017).

1104

2.3 MONITORAMENTO DO SISTEMA DE DESINFECÇÃO SOLAR

Durante os meses de julho a dezembro de 2015, a água cinza tratada foi coletada mensalmente, preferencialmente no dia 15 de cada mês, e transportada até o local do experimento, sendo armazenada em reservatório de 0,250 m³, e transferida para o reator solar, como ilustra a Figura 2.

As águas cinza já dispostas no reator solar foram expostas à radiação solar, no horário das 8h às 16h, e coletadas alíquotas a cada duas horas, totalizando 30 amostras simples ao longo do período experimental. O reator funcionou com lâmina de 0,10 m de água cinza, como esquematizado na Figura 3.

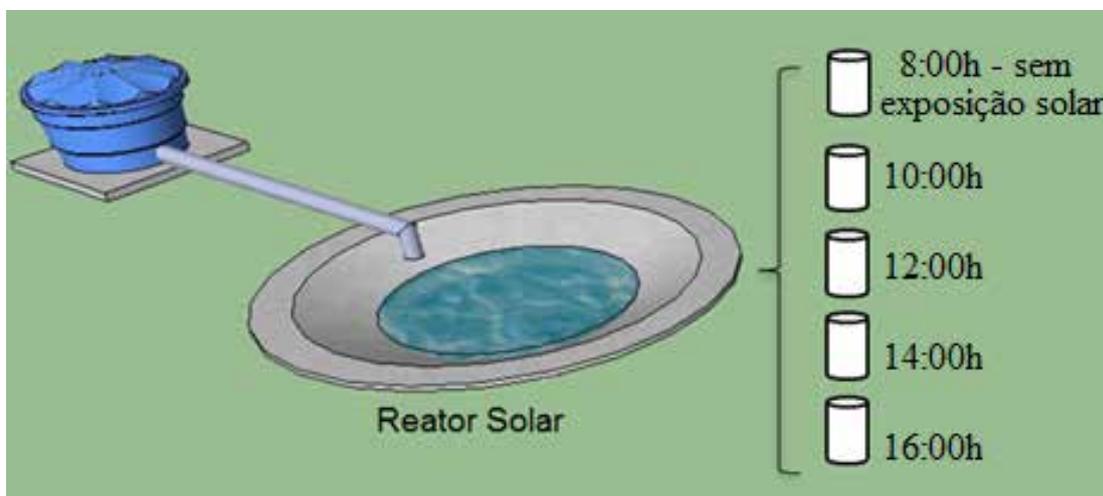


Figura 3. Esquema do sistema de desinfecção solar e procedimento de coleta.
Fonte: Cavalcante *et al.* (2018).

Para cada bateria de ensaio, foram realizadas medições de pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica em campo. O pH foi determinado através do método da potenciometria direta, utilizando um pHmetro acoplado a um eletrodo combinado de vidro, a condutividade elétrica por meio de um condutivímetro, temperatura utilizando-se um termômetro digital tipo espeto e o oxigênio dissolvido (OD) obtido por meio de um oxímetro digital.

As determinações de sólidos suspensos totais (SST), turbidez, cor aparente, coliformes totais, *E.coli* e ovos de helmintos, foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LASAN) na UFERSA.

As concentrações de SST foram determinadas pelo método gravimétrico com a utilização de membranas de fibra de vidro, tendo 1 μm de diâmetro de poro. A turbidez foi determinada por meio de turbidímetro de bancada, e a cor aparente determinada por meio de espectrofotômetro, com absorvância a 455 nm.

Para a quantificação dos indicadores microbiológicos foi utilizado o sistema Colilert, sistema patenteado por IDEXX Laboratories, que é utilizado nas detecções simultâneas, identificações específicas e confirmativas de coliformes totais e *E.coli*, metodologia também preconizada no *Standart methods for examination of water and wastewater* (BAIRD; EATON; RICE, 2017).

Para enumeração de ovos de helmintos foi utilizada a técnica de Bailenger modificada (AYRES; MARA, 1996), que deu origem à metodologia atualmente recomendada pela Organização Mundial de Saúde para a enumeração de ovos de helmintos em águas residuárias brutas e tratadas.

Paralelamente, foram obtidos os dados das variáveis ambientais: temperatura do ar e radiação solar global, por meio da estação meteorológica Jerônimo Rosado, localizada na UFERSA campus Mossoró, sob as coordenadas geográficas de 5°11'S e 37°20'O.

2.4 ANÁLISE DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA CINZA PARA USO AGRÍCOLA

Na avaliação da qualidade microbiológica da água cinza, ao longo do período experimental, quanto ao seu uso para fins de uso agrícola utilizaram as novas diretrizes da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006a), que estão sintetizadas na Tabela 1. A irrigação restrita é aquela em que as águas residuárias são utilizadas para cultivar plantas que não são consumidas cruas por seres humanos; enquanto na irrigação irrestrita o uso de águas residuárias tratadas é destinado ao cultivo de plantas que, normalmente, são consumidas cruas (WHO, 2006b).

Tabela 1. Valores de monitoramento (*E. coli* por 100 mL na água residuária tratada) para os vários níveis de tratamento de águas residuárias nas opções de A - H

Categoria Irrigação	Opção ⁽¹⁾	Tratamento de esgoto e remoção de patógenos (\log_{10}) ⁽²⁾	<i>E. coli</i> (100 mL) ⁽³⁾
Irrestrita	A	4	$\leq 10^3$
	B	3	$\leq 10^4$
	C	2	$\leq 10^5$
	D	4	$\leq 10^3$
	E	6 ou 7	$\leq 10^1$ ou $\leq 10^0$
Restrita	F	4	$\leq 10^4$
	G	3	$\leq 10^5$
	H	0,5	$\leq 10^6$

Nota: ⁽¹⁾ Combinação de medidas de proteção à saúde. (A): cultivo de raízes e tubérculos; (B): cultivo de folhosas; (C): irrigação localizada de plantas que se desenvolvem distantes do nível do solo; (D): irrigação localizada de plantas que se desenvolvem rentes ao nível do solo; (E): qualidade de efluentes alcançável com o emprego de técnicas de tratamento tais como tratamento secundário + coagulação + filtração + desinfecção; qualidade dos efluentes avaliada, ainda, com o emprego de indicadores complementares (por exemplo, turbidez, SST, cloro residual); (F): agricultura de baixo nível tecnológico e mão de obra intensiva; (G): agricultura de alto nível tecnológico e altamente mecanizada; (H): técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos (por exemplo, tanques sépticos ou reatores UASB) associada ao emprego de técnicas de irrigação com elevado potencial de minimização da exposição (irrigação subsuperficial); ⁽²⁾ Remoção de vírus que associada a outras medidas de proteção à saúde corresponderia a uma carga de doenças virais tolerável $\leq 10^{-6}$ DALY ppa e riscos menores de infecções bacterianas e por protozoários; e ⁽³⁾ Qualidade do efluente correspondente à remoção de patógenos indicada em (2).

Fonte: Adaptado de Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006b).

2.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Com o objetivo de classificar as amostras de águas cinza em grupos semelhantes que expressassem respostas físico-químicas e microbiológicas com tendências similares, utilizou-se a Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH), realizada através do programa R versão 3.2.3 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010).

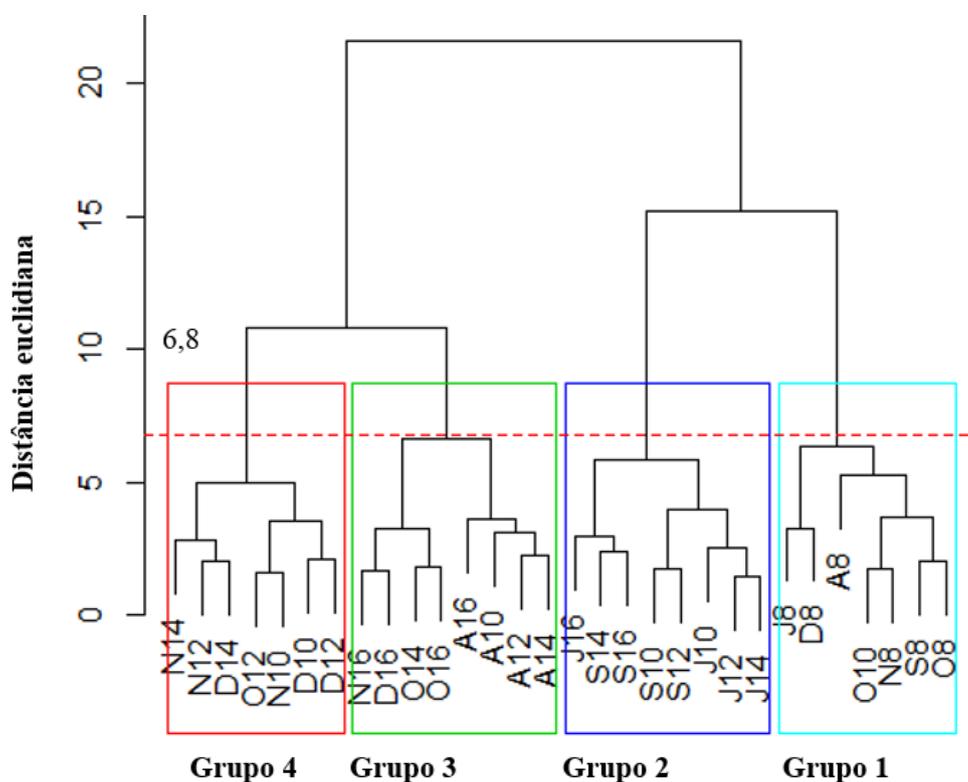
Os agrupamentos resultantes de objetos devem exibir elevada homogeneidade interna, dentro dos agrupamentos, e elevada heterogeneidade externa, entre agrupamentos. Através da análise de agrupamento é possível avaliar a similaridade, ou dissimilaridade, entre objetos, considerando várias características concomitantemente (ZHANG *et al.*, 2011).

As amostras foram aglomeradas através do critério de similaridade mensurada pela distância euclidiana, empregando o método Ward. Os dados médios de cada variável analisada dos respectivos grupos formados foram submetidos à análise de significância estatística, através do teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%, por meio do programa computacional SISVAR 5.6 desenvolvido por Ferreira (2011). Optou-se pelo uso do teste de Scott-Knott, já que é um teste isento de ambiguidades, evitando a sobreposição entre os grupos, além de que possui resultados claros e objetivos, quando comparados ao teste de Tukey (CANTERI *et al.*, 2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do emprego da técnica de Análise Multivariada/Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH) foi possível avaliar a similaridade (ou dissimilaridade) entre as amostras de águas cinza, considerando várias características concomitantemente.

O dendrograma observado, na Figura 4, evidenciou que o ponto ótimo de corte para a formação dos grupos de similaridade encontra-se em 6,8, pois, a partir desse, ocorre o distanciamento maior na medida de similaridade para a formação dos grupos; dessa forma, definem-se quatro agrupamentos distintos.



Nota: As letras representam as amostras em função dos meses (J, A, S, O, N, D - meses de julho a dezembro de 2015) e os números representam os horários de exposição solar das amostras (8, 10, 12, 14, 16 horas do dia).

Figura 4. Dendrograma de agrupamento construído a partir da matriz de distâncias euclidianas médias.

Os grupos formados pela AAH apresentaram certa uniformidade quanto à quantidade de amostras por grupo, onde os grupos 2 e 3 foram os de maior representatividade, cada um contribuindo com 26,6% do número das amostras total; enquanto os grupos 1 e 4 foram compostos, cada um, por 23,33% das amostras analisadas.

A maior similaridade foi registrada pelas amostras que compõem o grupo 4, devido à distância, nível, na qual ocorreu a formação dos grupos.

A AAH resultou classificação coerente das mesmas, demonstrando que o agrupamento ocorreu em função da sazonalidade, e do tempo de exposição solar a que as amostras foram submetidas.

Os valores médios (M), mínimo (Min), máximo (Max) e o coeficiente de variação (CV) das variáveis em estudo para os grupos definidos pela técnica AAH, assim como o teste de Scott-Knott a 5%, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios e teste de Scott-Knott das variáveis em estudo para os grupos definidos pela técnica de AAH

	Estatística	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Rg (MJ m ⁻²)	M + DP	1,53a ± 0,29	2,4b ± 0,92	1,83a ± 0,88	2,70b ± 0,38
	Min	1,06	0,71	0,79	2,25
	Max	1,77	3,34	3,26	3,47
	CV(%)	18,95	38,45	48,25	14
Rga (MJ m ⁻²)	M + DP	0,55a ± 1,45	12,99b ± 5,51	14,16b ± 4,90	10,59b ± 4,89
	Min	0,00	4,68	4,99	4,36
	Max	3,84	19,70	19,26	17,55
	CV(%)	264,57	42,39	34,63	46,22
Tar (°C)	M + DP	27,60a ± 1,53	32,92b ± 1,73	32,31b ± 1,55	33,31b ± 1,51
	Min	25,53	30,38	29,48	31,54
	Max	29,70	34,84	33,92	35,38
	CV(%)	5,53	5,25	4,79	4,51
Tag (°C)	M + DP	29,16a ± 1,50	36,04b ± 1,98	34,83b ± 2,15	38,58c ± 2,63
	Min	27,20	33,10	32,60	34,88
	Max	31,30	39,10	37,90	41,60
	CV(%)	5,15	5,50	6,18	6,80
pH	M + DP	7,86a ± 0,29a	7,90a ± 0,10a	8,24b ± 0,22b	7,89a ± 0,12a
	Min	7,66	7,80	7,93	7,73
	Max	8,48	8,06	8,50	8,09
	CV(%)	3,62	1,23	2,65	1,53
OD (mg L ⁻¹)	M + DP	2,3a ± 1,81	1,51a ± 0,30	4,27b ± 0,57	2,95a ± 1,0
	Min	0,21	0,93	3,45	1,00
	Max	4,70	1,89	5,24	3,80
	CV(%)	79,01	20,03	13,43	33,76
CE (μScm ⁻¹)	M + DP	1359a ± 127,5	1532b ± 111	1501b ± 157,5	1279a ± 61,7
	Min	1176	1408	1250	1203
	Max	1513	1675	1677	1388
	CV(%)	9,37	7,24	10,49	4,82
TB (UNT)	M + DP	44,27a ± 13,29	56a ± 7,35	28,33b ± 4,86	35,76b ± 5,29
	Min	26,30	48,60	22,50	27,80
	Max	67,80	64,60	36,30	42,60
	CV(%)	30	13,12	17,18	14,79
SST (mg L ⁻¹)	M + DP	21a ± 8,21	28,13b ± 6,53	15c ± 2,67	15,17c ± 6,54
	Min	14	16	11	2
	Max	34	38	19	21
	CV(%)	39	23,23	17,82	43,20
Log CT (Log de NMP100mL ⁻¹)	M + DP	6,07a ± 0,58	5,92a ± 0,34	4,73b ± 0,42	5,50a ± 0,60
	Min	5,61	5,55	4,07	4,64
	Max	7,19	6,44	5,25	6,29
	CV(%)	9,6	5,70	8,91	10,89
Log <i>E. coli</i> (Log de NMP100mL ⁻¹)	M + DP	5,11a ± 0,68	4,76a ± 0,51	3,29b ± 0,59	3,80b ± 0,61
	Min	4,48	4,02	2,71	3,00
	Max	6,48	5,72	4,30	4,71
	CV(%)	13,2	10,69	18,30	16,14

Nota: Rg - Radiação global; Rga - Radiação global acumulada; Tar - Temperatura média do ar; Tag - Temperatura média da água cinza; OD - Oxigênio dissolvido; CE - Condutividade elétrica; TB - Turbidez; SST - Sólidos suspensos totais; CT - Coliformes totais; *E. coli* - *Escherichia coli*; M - Valor da média aritmética; Min - Valor mínimo; Max - Valor máximo; CV - Coeficiente de variação; e Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem no teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

GRUPO 1

Formado por todas as amostras que não foram expostas à radiação solar, amostras identificadas pelo número 8, e a amostra O10.

As variáveis que mais contribuíram para a formação desse grupo foram a radiação global acumulada (Rga), temperatura do ar (Tar) e da água cinza (Tag) que diferiram dos demais grupos ($p \leq 0,05$). Por se tratar das amostras sem exposição solar, os valores de Rga, Tar e Tag foram os menores, em comparação com os demais grupos.

Outra característica relevante desse grupo são os elevados níveis populacionais de coliformes totais (CT) e *Escherichia coli* (*E. coli*), que estão relacionados aos baixos valores de Rga, Tar e Tag.

Sabe-se que em experimentos de desinfecção solar, o mecanismo de inativação dos micro-organismos patogênicos é resultado de um efeito combinado da radiação infravermelha, responsável pelo aquecimento da água e da radiação ultravioleta (SODIS, 2002), sendo relatado por diversos autores um forte efeito sinérgico entre os processos

ópticos e térmicos às temperaturas acima de 45 °C. Além disso, a Tar pode melhorar o processo quando é maior do que 20 °C (WEGELIN *et al.*, 1994; SICHEL *et al.*, 2007; UBOMBA JASWA *et al.*, 2009).

No Grupo 1 também está contemplada a amostra O10 que manteve características semelhantes às amostras sem tratamento solar. Provavelmente, a inserção da O10 nesse grupo está relacionada aos valores de condutividade elétrica (CE) e Tag que tiveram valores aproximados das amostras sem exposição solar. Observou-se CV alto para Rga neste grupo, o que é atribuído ao fato de que a Rga para as amostras é zero, início da manhã às 8 horas, exceto para amostra O10, o que contribuiu para grande variação de Rga neste grupo.

Em relação à qualidade microbiológica da água cinza, no Grupo 1 constatou-se que a média de log *E. coli* se enquadra na categoria de irrigação restrita e na opção tipo H da Organização Mundial de Saúde, como apresentado na Tabela 1, onde a água residuária foi submetida a técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos, tais como tanques sépticos ou reatores UASB, associada ao emprego de técnicas de irrigação com elevado potencial de minimização da exposição, como por exemplo a irrigação subsuperficial (WHO, 2006b).

GRUPO 2

Formado por todas as amostras do mês de julho e do mês de setembro de 2015, excetuando-se as amostras para esses meses que não sofreram desinfecção solar (J8 e S8).

O grupo foi formado pela similaridade entre as concentrações das características avaliadas, na qual se pode perceber que a característica SST foi a que mais contribuiu para a formação desse grupo.

1108

Os valores elevados de SST, e principalmente, turbidez (TB), foram relacionados à necessidade de limpeza do filtro orgânico que já funcionava há um ano. A limpeza ocorreu no início do mês de agosto, contribuindo assim para os valores altos de TB, principalmente para o mês de julho, que antecedeu a limpeza.

A qualidade físico-química e microbiológica da água cinza para esse grupo foi um pouco melhor do que para o Grupo 1, mas percebe-se que essas amostras tiveram os menores valores para o oxigênio dissolvido (OD), altos valores de TB e SST. Cabe ressaltar que no caso dos SST, estes diferiram estatisticamente dos demais grupos ($p \leq 0,05$). Essas características contribuíram para os elevados níveis populacionais de CT e *E. coli*, com valores bem próximos ao do Grupo 1.

A capacidade de desinfecção solar depende de fatores como a TB, altura da lâmina de água no reator, condições climáticas, tempo de exposição solar, intensidade solar, temperatura e concentração de oxigênio (SÁNCHEZ ROMÁN *et al.*, 2007).

A água para ser submetida ao sistema de desinfecção solar deve apresentar TB menor que 30 NTU, para evitar o elevado número de partículas suspensas na água, o que leva à redução da penetração de radiação solar, impedindo que a radiação atinja os micro-organismos, além de proteger aqueles presentes na água; ressalta-se que os valores médios de TB para esse grupo situaram-se acima dos valores recomendados por SODIS (2002).

Por outro lado, a capacidade dos processos solares de desinfetar água residuária sintética, com turbidez de 100 NTU, foi demonstrada em escala de laboratório com a redução de mais de 6 log das bactérias patogênicas humanas *Escherichia coli* e *Salmonella enteritidis*, em menos de 1 h de exposição solar (NAHIM-GRANADOS; SÁNCHEZ PÉREZ; POLO-LOPEZ, 2018).

O efeito bactericida da radiação solar na água depende, também, do nível de oxigênio dissolvido; o oxigênio presente na água durante a exposição à radiação solar produz espécies reativas de oxigênio (ERO), como OH⁻, H₂O₂ e O₂ (ALVES, 2015). Essas espécies químicas são altamente oxidantes e têm grande importância no ponto de vista

da desinfecção, auxiliando na inativação de micro-organismos, através do processo chamado de desinfecção foto-oxidativa solar (SODIS, 2002).

As ERO conseguem oxidar ácidos nucléicos, enzimas e lipídeos dos micro-organismos, causando perda da função biológica e, conseqüentemente, morte celular (MONCAYO-LASSO *et al.*, 2009).

Os altos valores da TB quando associados às componentes orgânicas causam o consumo nos níveis de OD, o que pode ter prejudicado o processo de desinfecção solar, contribuindo com os elevados níveis populacionais de CT e *E. coli*, verificados neste grupo.

Ao analisar o valor médio do log de *E. coli*, no Grupo 2, notou-se que a qualidade microbiológica da água cinza é superior à do Grupo 1 e se enquadra em duas categorias e duas opções estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde; primeiro, na categoria de irrigação irrestrita e opção tipo C, onde se recomenda a irrigação localizada de plantas que se desenvolvem distantes do nível do solo; e segundo, na categoria de irrigação restrita e opção G, recomendada para agricultura de alto nível tecnológico e altamente mecanizada (WHO, 2006b).

GRUPO 3

Formado por todas as amostras do mês de agosto de 2015 (excetuando-se a amostra sem exposição solar A8), e o restante das amostras das 16 horas, com acréscimo apenas da amostra O14.

As características CE, OD e pH foram as que mais contribuíram para a formação do grupo, principalmente OD e pH, pois diferiram estatisticamente dos demais grupos ($p \leq 0,05$). O mês de agosto apresentou-se como o mês que teve maior eficiência em termos de remoção microbiológica, assemelhando-se às amostras do tratamento final (amostras identificadas pelo número 16, após 8 horas de exposição solar).

Além de que, foi o mês com o menor valor para TB (único mês com valor médio abaixo de 30 UNT), maior valor de OD e pH, e menor nível populacional para CT.

O aumento no pH influencia na remoção bacteriana provocando a ionização dos constituintes da membrana plasmática, a qual em última instância inativa os sistemas enzimáticos que afetam as células bacterianas (TORRES, 2011). No entanto, o pH no intervalo estudado apresenta pouca influência sobre as remoções bacterianas no processo de desinfecção solar (AHAMMED *et al.*, 2015).

Esse grupo também obteve os maiores valores de Rga, que, juntamente com o pH e OD elevados, devem ter contribuído para as maiores remoções de CT e *E. coli*. Sendo; assim, esse grupo foi o que apresentou maior qualidade físico-química e microbiológica da água cinza.

Baseando-se no valor médio do log de *E. coli*, a qualidade microbiológica da água cinza do Grupo 3 foi superior à dos Grupos 1 e 2, ampliando assim as suas possibilidades para uso agrícola. A água cinza desse grupo se enquadra em duas categorias e cinco opções de uso agrícola conforme as orientações da Organização Mundial de Saúde: na categoria de irrigação irrestrita foi inserida nas opções B, que possibilita o cultivo de folhosas, e C, relacionada ao uso de irrigação localizada de plantas que se desenvolvem distantes do nível do solo; e na categoria de irrigação restrita enquadrou-se nas opções F, referente à agricultura de baixo nível tecnológico e mão de obra intensiva, G, destinada à agricultura de alto nível tecnológico e altamente mecanizada, e H, associada a técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos associada ao emprego de técnicas de irrigação com elevado potencial de minimização da exposição (WHO, 2006b).

GRUPO 4

As características de maior influência na formação deste grupo estão relacionadas às condições climáticas, sendo as características de radiação global, temperatura do ar e da água os aspectos que mais contribuíram para a formação do grupo. Na composição do grupo estão as amostras das 10, 12 e 14 horas que se assemelharam quanto aos valores climáticos.

A Tag foi a característica que mais contribuiu para a formação do grupo, pois diferiu estatisticamente dos demais grupos ($p \leq 0,05$).

Como as condições climáticas, radiação e temperatura contribuem para eficiência em termos de decaimento bacteriano, este grupo apresentou a maior temperatura da amostra, assim como o maior valor para radiação global, contribuindo, portanto, para a remoção de CT e *E. coli*.

Com base no valor médio do log de *E. coli* e nas diretrizes da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006b), a qualidade microbiológica da água cinza para fins de irrigação desse grupo é semelhante à do Grupo 3, e superior à dos Grupos 1 e 2.

Nesse grupo, ao analisar o valor médio do log de *E. coli*, a água cinza desse grupo se enquadra, também, em duas categorias e cinco opções de uso agrícola; na categoria de irrigação irrestrita foi inserida nas opções B e C; e na categoria de irrigação restrita enquadrou-se nas opções F, referente à agricultura de baixo nível tecnológico e mão de obra intensiva, G, destinada à agricultura de alto nível tecnológico e altamente mecanizada, e H, associada a técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos associada ao emprego de técnicas de irrigação com elevado potencial de minimização da exposição (WHO, 2006b).

1110

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de agrupamento hierárquico resultou uma classificação coerente das amostras, demonstrando que o agrupamento ocorreu em função da sazonalidade, e do tempo de exposição solar a que as amostras de águas cinza foram submetidas. Identificaram-se quatro grupos distintos de qualidade, que diferiram quanto aos valores das características climáticas, físico-químicas e microbiológicas.

Nos Grupos 3 e 4 ocorreram os menores níveis populacionais de *E. coli* da água cinza ($<10^4$ NMP 100 mL⁻¹), permitindo alguns tipos de uso agrícola restrito e irrestrito do efluente, conforme recomendação de qualidade microbiológica estabelecida pela Organização Mundial de Saúde.

REFERÊNCIAS

- AHAMMED, M. M.; DAVE, S.; NAIR, A. T. Effect of water quality parameters on solar water disinfection: a statistical experiment design approach. **Desalination and Water Treatment**, v. 56, n. 2, p. 315-326, 2015.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, T. R. **Eficiência de um sistema de desinfecção solar de águas residuárias domésticas com adição de diferentes doses de peróxido de hidrogênio**. 63f. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2015.

- AYRES, R.; MARA, D. **Analysis of wastewater for use in agriculture: a laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques.** Geneva: WHO, 1996. 35p.
- BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 23. ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2017. 1504p.
- BENAMI, M.; GILLOR, O.; GROSS, A. Potential microbial hazards from graywater reuse and associated matrices: A review. **Water Research**, v. 106, p. 183-195, 2016.
- CANTERI, M. G.; ALTHAUS, R. A.; VIRGENS FILHO, J. D.; GIGLIOTI, E. A.; GODOY, C. V. SASM-Agri: Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scott-Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v. 1, n. 2, p. 18-24, 2001.
- CAVALCANTE, F. L.; BEZERRA, J. M.; BATISTA, R. O.; SILVA, K. B.; MENDES, H. C. Análise de componentes principais aplicada à desinfecção solar de águas cinza para reúso no semiárido potiguar. **Irriga**, v. 23, n. 3, p. 480-492, 2018.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FOUNTOULAKIS, M. S.; MARKAKIS, N.; PETOUSHI, I.; MANIOS, T. Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. **Science of the Total Environment**, v. 551, n. 1, p. 706-711, 2016.
- LOBO, M. A. A.; LIMA, D. M. B.; SOUZA, C. M. N.; NASCIMENTO, W. A.; ARAÚJO, L. C. C.; SANTOS, N. B. Avaliação econômica de tecnologias sociais aplicadas à promoção de saúde: abastecimento de água por sistema SODIS em comunidades ribeirinhas da Amazônia. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 7, n. 18, p. 2119-2127, 2013.
- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. **Microbiologia de Brock.** 10. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. 608p.
- MARCELINO, R. B. P.; QUEIROZ, M. T. A.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D.; BRITES-NÓBREGA, F. F. Solar energy for wastewater treatment: review of international technologies and their applicability in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 2, p. 762-773, 2015.
- MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas e aproveitamento de águas pluviais em edificações.** Poli-USP. 2008. 222f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MECHA, A. C.; ONYANGO, M. S.; OCHIENG, A.; MOMBA, M. N. B. UV and solar photocatalytic disinfection of municipal wastewater: inactivation, reactivation and regrowth of bacterial pathogens. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 7, p. 3687-3696, 2019.
- MONCAYO-LASSO, A.; SANABRIA, J.; PULGARIN, C.; BENÍTEZ, N. Simultaneous *E. coli* inactivation and NOM degradation 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.
- NAHIM-GRANADOS, S.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; POLO-LOPEZ, M. I. Effective solar processes in fresh-cut wastewater disinfection: Inactivation of pathogenic *E. coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis*. **Catalysis Today**, v. 313, p. 79-85, 2018.
- PAIVA, R. F. P. S.; SOUZA, M. F. P. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 1, e00017316, 2018.

PIRES, F. J. **Construção participativa de sistema de tratamento de esgoto no Assentamento Rural Olga Benário-MG**. 2012. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

QUELUZ, J. G. T.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Efficiency of domestic wastewater solar disinfection in reactors with different colors. **Water Utility Journal**, v. 7, n. 1, p. 35-44, 2014.

R Development Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**, reference index version 2.12.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2010.

SÁNCHEZ-ROMAN, R. M.; SOARES, A.; MATOS, A. T.; SEDIYAMA, G. C.; DESOUZA, O.; MOUNTEER, A. H. Domestic wastewater disinfection using solar radiation for agricultural reuse. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 1, p. 65-71, 2007.

SHAMABADI, N.; BAKHTIARI, H.; KOCHAKIAN, N.; FARAHANI, M. The investigation and designing of an onsite grey water treatment systems at Hazrat-e-Masoumeh University, Qom, IRAN. **Energy Procedia**, v. 74, n. 1, p. 1337-1346, 2015.

SICHEL, C.; BLANCO, J.; MALATO, S.; FERNANDEZ-IBANEZ, P. Effects of experimental conditions on E. coli survival during solar photocatalytic water disinfection. **Journal of Photochemistry and photobiology A: Chemistry**, v. 189, n. 2, p. 239-246, 2007.

SODIS. **Climatic conditions**: solar radiation. Dübendorf: EAWAG/SANDEC, 2003. 1p. (Technical Note 5).

SODIS. **Solar water disinfection**: a guide for the application of SODIS. Dübendorf: EAWAG/SANDEC, 2002. 88p. (SANDEC Report n° 06/02).

1112

SPUHLER, D.; RENGIFO-HERRERA, J. A.; PULGARIN, C. The effect of Fe_2^+ , Fe_3^+ , H_2O_2 and the photo-Fenton reagent at near neutral pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing *Escherichia coli* K12. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 96, n. 1, p. 126-141, 2010.

TORRES, D. M. **Decaimento bacteriano em lagoas de estabilização no Nordeste brasileiro**. 2011. 99f. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

UBOMBA-JASWA, E.; NAVNTOFT, C.; POLO-LOPEZ, M. I.; FERNANDEZ-IBÁÑEZ, P.; MCGUIGAN, K. G. Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 8, n. 5, p. 587-595, 2009.

WEGELIN, M.; CANONICA, S.; MECHSNER, K.; FLEISCHMANN, T.; PESARO, F.; METZLER, A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. **Aqua**, v. 43, n. 4, p. 154-169, 1994.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: policy and regulatory aspects**. Genebra: WHO, 2006a. Vol. 1. 100p.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: wastewater use in agriculture**. Genebra: WHO, 2006b. Vol. 2. 196p.

ZHANG, X.; WANG, Q.; LIU, Y.; WU, J.; YU, M. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of water quality in the Southwest New Territories and Kowloon, Hong Kong. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 173, n. 1, p. 17-27, 2011.

