

Cristiane do Nascimento Fernandes
Fernanda Lima Cavalcante
Rafael Oliveira Batista
(ORGANIZADORES)

DESINFECÇÃO SOLAR DE EFLUENTES SANITÁRIOS

Cristiane do Nascimento Fernandes
Fernanda Lima Cavalcante
Rafael Oliveira Batista
(ORGANIZADORES)

DESINFECÇÃO SOLAR DE EFLUENTES SANITÁRIOS



editoraifrn

Natal, 2019

Presidente da República
Jair Messias Bolsonaro

Ministro da Educação
Abraham Weintraub

Secretário de Educação Profissional e Tecnológica
Ariosto Antunes Culau



INSTITUTO FEDERAL
Rio Grande do Norte

Reitor

Wyllys Abel Farkatt Tabosa

Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação
Márcio Adriano de Azevedo

Coordenadora da Editora IFRN
Kadydja Karla Nascimento Chagas

Conselho Editorial

Albino Oliveira Nunes
Ana Paula Borba Costa
Anderson Luiz Pinheiro de Oliveira
Anisia Karla de Lima Galvão
Carla Katarina de Monteiro Marques
Cláudia Battestin
Emiliana Souza Soares Fernandes
Fabrícia Abrantes Figueredo da Rocha
Francinaide de Lima Silva Nascimento
Fábio Alexandre Araújo dos Santos
Genoveva Vargas Solar
Jose Geraldo Bezerra Galvão Junior
José Augusto Pacheco
José Everaldo Pereira
Jozilene de Souza

Jussara Benvindo Neri
Kadydja Karla Nascimento Chagas
Lenina Lopes Soares Silva
Luciana Maria Araújo Rabelo
Maria da Conceição de Almeida
Márcio Adriano de Azevedo
Nadir Arruda Skeete
Paulo de Macedo Caldas Neto
Ramon Evangelista dos Anjos Paiva
Regia Lúcia Lopes
Rejane Bezerra Barros
Rodrigo Luiz Silva Pessoa
Sílvia Regina Pereira de Mendonca
Wyllys Abel Farkatt Tabosa

Projeto Gráfico, Diagramação e Capa
Anderson Paulo Nascimento de Oliveira

Coordenação de Design
Charles Bamam Medeiros de Souza

Revisão Linguística
Sayara de Medeiros Xavier

Coordenação de Revisão
Rodrigo Luiz Silva Pessoa

Prefixo editorial: 94137
Linha Editorial: Artístico-Literária
Disponível para *download* em:
<http://memoria.ifrn.edu.br>



Contato

Endereço: Rua Dr. Nilo Bezerra Ramalho, 1692, Tirol, Natal-RN.
CEP: 59015-300. Telefone: (84) 4005-0763 | E-mail: editora@ifrn.edu.br

**DESINFECÇÃO
SOLAR
DE EFLUENTES
SANITÁRIOS**



Os textos assinados, no que diz respeito tanto à linguagem quanto ao conteúdo, não refletem necessariamente a opinião do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. As opiniões são de responsabilidade exclusiva dos respectivos autores. É permitida a reprodução total ou parcial desde que citada a fonte.

D457 Desinfecção solar de fluentes sanitários / organizador Cristiane do Nascimento Fernandes, Fernanda Lima Cavalcante, Rafael Oliveira Batista; projeto gráfico, diagramação e capa Anderson; coordenação de design Charles Bamam Medeiros de Souza; revisão textual Sayara de Medeiros Xavier; coordenação de revisão textual Rodrigo Luiz Silva Pessoa. – Natal: IFRN, 2019.
100 p. : il.

ISBN: 978-85-94137-81-4

1. Meio ambiente – Aproveitamento solar. 2. Meio ambiente – Saneamento básico. 3. Meio ambiente – Esgotamento sanitário. I. Fernandes, Cristiane do Nascimento (Org.). II. Cavalcante, Fernanda Lima. III. Batista, Rafael Oliveira. IV. Título.

CDU 502

Catálogo da publicação na fonte elaborada pela Bibliotecária
Patrícia da Silva Souza Martins – CRB: 15/502

Esta obra foi submetida e selecionada por meio de edital específico para publicação pela Editora IFRN, tendo sido analisada por pares no processo de editoração científica.

PREFÁCIO

O investimento em políticas públicas voltadas a ações de saneamento básico, tanto em centros urbanos quanto em comunidades rurais, tem se tornado cada vez mais importante e necessário à promoção da saúde e qualidade de vida da população. Figura como parcela importante dentre estas ações a implementação e ampliação de sistemas de esgotamento sanitário que permitam a coleta, o transporte e o tratamento adequado das águas contaminadas pela atividade humana.

Em zonas rurais, ainda é frequente o vislumbre de um cenário de ausência ou inexistência de sistemas de esgotamento sanitário capazes de garantir a sanidade ambiental, bem como a saúde dos habitantes. A distância dos centros urbanos aliada à falta de investimento em dispositivos domésticos de tratamento de efluentes eficazes podem ser considerados os principais fatores contribuintes para a permanência deste cenário.

Sabe-se que a população exposta a ambientes privados de um sistema de esgotamento sanitário eficaz está sujeita a uma série de organismos capazes de provocar doenças graves e, em situações mais extremas, até mesmo a morte. Ademais, deve-se considerar que além do prejuízo a saúde, o meio ambiente também é impactado, principalmente os corpos hídricos superficiais.

Como forma de contribuir com o aumento da promoção de ações de tratamento de efluentes em zonas rurais, esta obra foi desenvolvida dando enfoque à técnica de eliminação de organismos patogênicos através da desinfecção solar. Apesar

do corrente uso desta técnica em sistemas de tratamento coletivo em centros urbanos, em zonas rurais ela se encontra deficiente ou inexistente.

Sendo assim, esta obra surge como uma boa alternativa de consulta técnica, na qual estudantes de escolas técnicas e universidades interessados pelo tema podem encontrar informações importantes, apresentadas de forma clara e objetiva, sobre técnicas de tratamento de efluentes através de desinfecção solar em zonas rurais.

Jerônimo Andrade Filho

Doutor em Manejo de Solo e Água

Mestre em Ciência do Solo

Engenheiro Civil

AUTORES

FERNANDA LIMA CAVALCANTE

Tecnóloga em Meio Ambiente pelo Centro Federal Tecnológico do Rio Grande do Norte (2005), Bióloga pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), Mestre em engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2007) e Doutora em Manejo do Solo e Água, pela Universidade Federal Rural do Semiárido (2017).

Atualmente é Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Possui experiência na área de engenharia sanitária, atuando principalmente nos temas: tratamento de esgoto, análises físico-químicas e biológicas de efluentes, lodos, microbiologia, parasitologia e saneamento ambiental.



RAFAEL OLIVEIRA BATISTA

Possui Pós-Doutorado (2010), Doutorado (2008), Mestrado (2004) e Graduação (2002) em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é Professor Associado I da Universidade Federal Rural do Semiárido, membro do Conselho do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental desta e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (Conceito 4).



Líder do Grupo de Pesquisa Tratamento e Manejo de Resíduos para o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido. Possui participação em

142 bancas examinadoras de monografias, especializações, dissertações e teses. Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Recursos Hídricos e Ambientais, atuando principalmente nos seguintes temas: engenharia de irrigação, saneamento ambiental, e tratamento e manejo de resíduos agroindustriais e urbanos.

CRISTIANE DO NASCIMENTO FERNANDES

Mestra em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2018). Detentora também dos títulos de Engenheira Civil (2014) e Bacharela em Ciência e Tecnologia (2012) pela Universidade Federal Rural do Semiárido.



Possui formação técnica em Saneamento (2019), Segurança do Trabalho (2017), Edificações (2014) e Mecânica Industrial (2008), todos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Possui experiência na área de Engenharia Civil, atuando principalmente nos temas: desenvolvimento de materiais alternativos para construção, planejamento e controle de obras e saneamento ambiental.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
DESINFECÇÃO SOLAR: UMA ABORDAGEM GERAL	15
ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	21
PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ÓPTICA E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	27
EFEITOS DA RADIAÇÃO SOLAR NOS MICRORGANISMOS E MECANISMOS DE REPARO DE DANOS.....	31
FATORES QUE INFLUENCIAM A DESINFECÇÃO SOLAR.....	37
• Características das águas residuárias	37
• Presença de oxigênio.....	46
• Temperatura e tempo de exposição solar.....	48
• Dose de radiação ultravioleta.....	55
• Efeito da radiação ultravioleta em relação ao tipo de organismo.....	57
• Distribuição da radiação solar e condições climáticas.....	59
LIMITAÇÕES DO USO DA RADIAÇÃO SOLAR PARA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES.....	69
CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	71
DIRETRIZES DA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE PARA REÚSO AGRÍCOLA DE EFLUENTES.....	77

Introdução

O desenvolvimento tecnológico apresenta-se, em todas as áreas do conhecimento, como o alicerce para a construção de grandes perspectivas em relação aos inúmeros problemas ambientais recorrentes.

Algumas das soluções adotadas em face dos impasses ambientais dizem respeito à desinfecção solar como forma de tratamento de efluentes, em detrimento da crise hídrica, por sua vez tão enfatizada nos últimos anos.

Haja vista a primordial importância da água não somente para o desenvolvimento para a sociedade, mas também para a sobrevivência dos seres vivos, cada vez mais pesquisas, tanto teóricas quanto práticas, dentro desse contexto, vêm sendo realizadas e aperfeiçoadas.

A engenharia é um dos setores que mais crescem em termos de inovação, todavia está também em constante transformação. Dessa forma, periodicamente, antigos requisitos são substituídos por novos, e daí tem-se a relevância da continuidade das pesquisas. Assim são construídas as diferentes realidades existentes para cada região e país, conforme a semelhança de seus parâmetros para análise de determinado fenômeno.

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) evidenciam que 24 milhões de brasileiros não possuem rede de abastecimento de água em seus domicílios. Além disso, 34,8 milhões destes habitantes vivem em residências sem rede coletora de águas residuárias domésticas. Tal problema se estende a todas as regiões do país e a população rural é a mais afetada ^[1].

Diante deste cenário, visando contemplar estas crescentes demandas de água de qualidade aliadas à necessidade de

conservação da qualidade dos recursos hídricos, tem sido cada vez mais incentivada a busca por novas técnicas, ou mesmo o aperfeiçoamento das já existentes, para o tratamento de efluentes, tendo em vista seu aproveitamento ou o lançamento no meio ambiente.

As tecnologias convencionais de tratamento de efluentes são eficientes. No entanto, o elevado custo de implantação e operação dificulta a utilização dessas unidades de tratamento, principalmente nas zonas rurais. Nessas localidades, a maioria das residências são distantes umas das outras, o que inviabiliza, na maioria dos casos, a adoção de sistemas coletivos de tratamento de efluentes domésticos.

Visando desenvolver e aprimorar tecnologias na área de águas residuárias de fácil aplicabilidade, baixo custo e simples manutenção, a desinfecção solar vem se destacando como uma técnica que promove remoção de patógenos. Ela vem garantindo um tratamento adequado às águas residuárias de países em desenvolvimento, e até mesmo em áreas rurais, resultando na melhoria da qualidade de vida para a população brasileira, especialmente para as comunidades menos favorecidas.

Além de ser uma opção de tratamento de baixo custo, a desinfecção solar não necessita de recursos tecnológicos e operacionais significativos, uma vez que utiliza o sol como fonte de radiação ultravioleta e calor. Com isso, é uma técnica perfeitamente aplicável para reduzir o nível populacional de agentes patogênicos para os níveis estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde – OMS, que, para irrigação de cultivos agrícolas sem restrições, recomenda valores inferiores a 1000 E. coli por 100 mL de efluente tratado, e inferiores a 1 ovo de verme por litro de efluente tratado ^[9].

CAPÍTULO 01

DESINFECÇÃO SOLAR: UMA ABORDAGEM GERAL

A radiação ultravioleta tem obtido uma crescente aplicação como alternativa aos agentes químicos no processo de desinfecção de águas de abastecimento e de águas residuárias, surgindo como uma alternativa limpa e efetiva aos métodos de desinfecção que utilizam agentes químicos, tais como o cloro, dióxido de cloro ou ozônio [3,4].

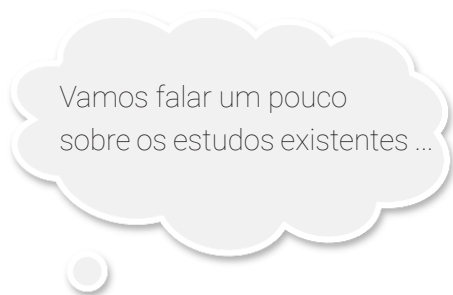
Será que o Sol é a única fonte de radiação ultravioleta?

Apesar de o Sol ser a fonte primária de radiação ultravioleta, esta também pode ser emitida por outras fontes, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes, solda elétrica, maçarico de plasma e equipamentos a laser [5].

O sol é fonte natural, universalmente disponível e gratuita, tanto de calor como de radiação ultravioleta. É uma fonte-base de um método de desinfecção efetivo e de baixo custo para uso em regiões afastadas e menos favorecidas, principalmente em países em desenvolvimento e áreas críticas [6].



Esse uso da energia solar para tratamento de água não é uma descoberta recente. Já existem registros sobre sua utilização na antiga Índia que remontam a 2000 a.C [7].

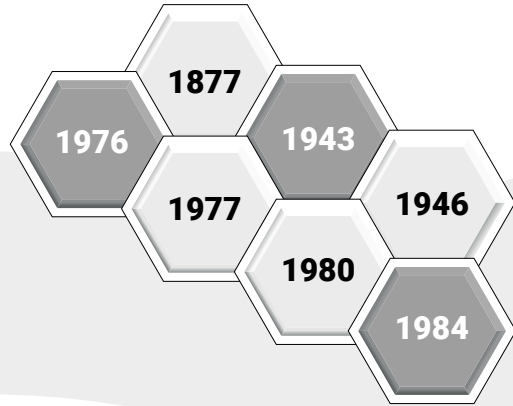


O primeiro estudo controlado sobre a capacidade da luz solar de inibir o crescimento bacteriano foi relatado em 1877, por Downes e Blunt, que demonstraram que a luz era capaz de inativar tanto as bactérias como inibir o seu crescimento. Já em 1943, Hollaender realizou o primeiro estudo quantitativo de inativação de *E.coli* próximo à radiação ultravioleta. E em 1946, Lukiesh relatou a capacidade da luz natural em inativar *E. coli* [8].

Mais recentemente, em 1976, Calkins confirmou que simulando raios UV-B rapidamente consegue inativar *E.coli* e outros organismos indicadores. Na década de 1980, o professor Aftim Acra, da Universidade Americana de Beirute, publicou os primeiros estudos quantitativos sobre a desinfecção solar de água potável, conhecida como SODIS (do inglês Solar Disinfection) [8].

Em 1984, a UNICEF publicou um livro chamado "Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions" [9], que se refere às primeiras experiências científicas com desinfecção solar de água, feitas em um estudo de campo na Universidade de Beirute, no Líbano, tendo como foco a redução de *E.coli* sob influência dos raios ultravioleta.

Desde então esta tecnologia tem sido desenvolvida e aperfeiçoada como uma solução extremamente barata para a desinfecção de água para consumo humano, e várias organizações, entidades e universidades vêm ampliando as pesquisas nessa área^[9].



Dos trabalhos realizados, destacam-se: os do Instituto Suíço Federal de Ciência Aquática e Tecnologia (EAWAG); os do Departamento de Higiene de Povoamento em Países Subdesenvolvidos (SANDEC), pertencente à mesma EAWAG e situado em Dübendorf, na Suíça; os do Instituto de Investigação e Desenvolvimento em Água Potável, Saneamento Básico e Conservação dos Recursos Hídricos (CINARA) em Cali-Colômbia; e os da rede de pesquisa montada pela Associação do Sistema Integrado de Energia Rural (INRESA), no Canadá, com participação de cinco países: Peru, Colômbia, Nigéria, Egito e Sri Lanka e ainda pelo apoio financeiro do UNICEF às pesquisas^[9].

No Brasil as pesquisas referentes à desinfecção por ultravioleta foram iniciadas em 1977, tendo por objetivo a desinfecção de esgotos^[10]. No entanto, a maioria das pesquisas a nível de Brasil se restringem ao uso de lâmpadas ultravioleta, sendo ainda muito escassas investigações experimentais mais detalhadas sobre a desinfecção com energia solar para águas residuárias.

As limitações dos estudos realizados sobre o uso da radiação ultravioleta para a desinfecção de águas residuárias domésticas por famílias de baixa renda nos países em desenvolvimento incluem^[11]:

O processo necessita de lâmpadas ou de estruturas complexas para serem construídas e mantidas;

A maioria dos trabalhos é realizado com enfoque em água para consumo humano e não em água para irrigação;

A maior parte dos sistemas desenvolvidos necessita de energia elétrica, que pode não estar disponível em áreas rurais.

O processo de desinfecção pela energia solar tem dois componentes principais: a luz ultravioleta, que irradia os microrganismos e induz a formação de formas reativas de oxigênio e a radiação infravermelha que aquece a água. O primeiro, a radiação ultravioleta, tem um efeito de germicida. O segundo componente, a radiação infravermelha, aumenta a temperatura da água, e é conhecida como pasteurização,

quando a temperatura da água é elevada entre 70°C e 75°C. O uso combinado da radiação ultravioleta e da produção de calor causa um efeito em conjunto que aumenta a eficiência do processo [12].

Existem diversos modelos e formas de realizar a desinfecção solar, mas, de modo geral, o sistema é composto apenas por um recipiente que permita a exposição (da água ou efluente) à radiação solar, e para isso podem ser utilizadas garrafas PET (politereftalato de etileno), garrafas de vidro, reatores, caixas de concreto ou outros elementos [13].

RESUMINDO:

Combinando baixo custo de implantação, tecnologia simples e eficaz, o uso da energia solar para desinfetar águas residuárias domésticas traz a possibilidade de viabilizar o seu reuso na agricultura, minimizando os impactos sobre os recursos hídricos do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Foi possível visualizar, neste capítulo, como este tema adquiriu grande relevância no contexto econômico, ambiental e de promoção da saúde, podendo ser adotado em países em desenvolvimento e em comunidades rurais de baixa renda.

CAPÍTULO 02

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

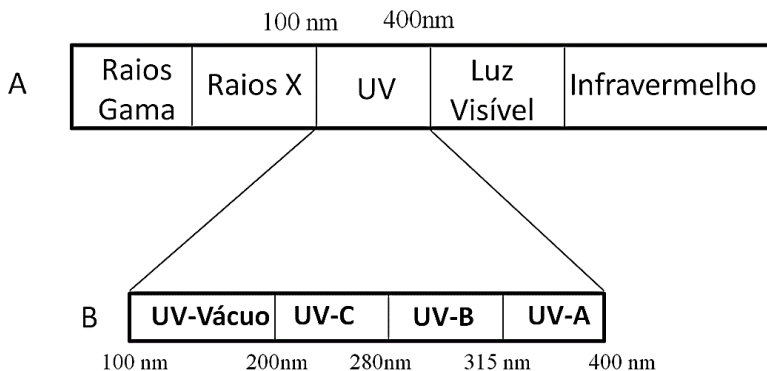
De acordo com a teoria desenvolvida por Einstein em 1905, a intensidade de energia emitida por uma fonte qualquer é definida como sendo inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Assim, comprimentos de onda mais baixos na escala do espectro eletromagnético provocam perturbações mais intensas quando absorvidos ^[14].

Quando uma estrutura biológica absorve fótons (pequenas partículas que compõem a luz), sua energia interna aumenta proporcionalmente à intensidade de radiação recebida. Com isso, dependendo do comprimento de onda emitido, a energia a ele associada pode provocar alterações bioquímicas (reversíveis ou não) nas moléculas atingidas ^[15].

A radiação solar pode ser dividida em três gamas de comprimento de onda: radiação ultravioleta, luz visível e radiação infravermelha.

A desinfecção por radiação ultravioleta artificial consiste, fundamentalmente, na transferência de energia eletromagnética com origem nas lâmpadas de mercúrio até as células dos microrganismos. A radiação, ao penetrar nas células, é absorvida pelo ácido nucléico, interferindo de forma negativa na reprodução dos microrganismos ^[16]. No espectro eletromagnético, o comprimento de onda da luz ultravioleta situa-se entre o dos raios-X e da luz visível (Figura 1-A).

Figura 1 - Faixas da Radiação Eletromagnética: A-Espectro eletromagnético, B-espectro expandido da radiação ultravioleta^[17].



Enquanto que a luz ultravioleta pode ser dividida em quatro faixas (Figura 1-B), baseada nos seus efeitos sobre os seres vivos^[17,18].

<p>UV-A: compreende o comprimento de onda entre 315 nm a 400 nm. É o menos perigoso para os seres humanos, devido à baixa energia. É utilizada para causar fluorescência em materiais, sendo muito utilizado em fototerapia e câmaras de bronzeamento.</p>	<p>UV-B: sua faixa de comprimento de onda compreende 280 nm a 315 nm. É a forma mais destrutiva da luz ultravioleta, pois possui energia o bastante para causar danos em tecidos biológicos. É a radiação ultravioleta identificada como causadora do câncer de pele.</p>
--	---

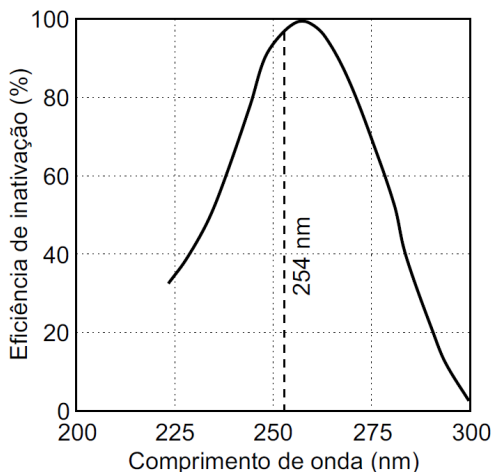
UV-C: possui comprimento de onda entre 200 nm a 280 nm. É a forma aplicada como germicida. O comprimento de onda de maior efeito bactericida é o de 254 nm. No entanto, a absorção máxima de radiação por seu material genético ocorre em 260 nm, e o comprimento de onda de 254 nm é relativo à emissão máxima de lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio. O intervalo compreendido entre 245 nm e 285 nm é considerado a faixa germicida ótima para inativação de microrganismos.

UV-Vácuo: caracterizado por radiações com comprimento de onda que variam de 40 nm a 200 nm. Os raios ultravioletas do vácuo são impraticáveis para aplicação de desinfecção de águas e esgoto, porque se dissipam rapidamente em meio líquido em pequenas distâncias.

A inativação de microrganismos patogênicos é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação: radiação visível → UV-A → UV-B → UV-C [19].

A camada de ozônio controla a passagem de radiação, absorvendo os raios ultravioletas entre 200 a 300 nm (UV-C e UV-B). Só uma fração mais alta da radiação UV-A, na gama de comprimento de onda de 320 nm- 400 nm e próxima da radiação violeta visível, alcança a superfície terrestre [12]. Portanto, o efeito bactericida da radiação solar está associado principalmente à radiação UV-A [9, 20].

Figura 2 - Efeito germicida associado ao comprimento de onda ultravioleta [18].



Em um processo de desinfecção, a radiação ultravioleta interage com os materiais componentes do reator e do líquido a ser tratado através dos processos de absorção, refração, reflexão e dispersão.

A absorção é a transformação da radiação para outras formas de energia, quando ela atravessa uma substância e é variável com o comprimento de onda (λ) da luz. Já a reflexão é a mudança na direção da propagação da radiação solar por uma dada superfície de contato, podendo ser especular (ocorre a partir de superfícies lisas e polidas, ou ainda, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão) ou difusa (quando ocorre em superfícies ásperas e irradia radiação em todas as direções, com uma pequena dependência do ângulo de incidência), de acordo com o material utilizado [17].

A refração é o fenômeno em que a radiação é transmitida de um meio para outro com característica diferente, porém

com a frequência se mantendo constante, embora sua velocidade de propagação e comprimento de onda apresentem variações. Por fim, a dispersão remete à mudança na direção da propagação da radiação solar causada pela interação com uma partícula. As partículas podem causar dispersão em todas as direções, inclusive para a fonte de radiação solar incidente^[21].

CAPÍTULO 03

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ÓPTICA E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Na perspectiva de uma maior compreensão dos mecanismos e dos processos envolvidos na desinfecção de efluentes sanitários por radiação ultravioleta, algumas definições e conceitos básicos da física, aplicados à radiação ultravioleta, são apresentados a seguir:

Fonte de energia UV (S): é a energia (W) emitida em todas as direções por uma fonte.

Intensidade (I): pode ser definida como a energia total incidente em todas as direções em um elemento infinitesimal de área transversal dA , contendo o ponto considerado. Em unidades do sistema internacional SI, a unidade de intensidade é $W.m^{-2}$, entretanto, é comum o uso de $mW.cm^{-2}$ ($1 mWcm^{-2} = 10 W.m^{-2}$). Para uma posição à distância de um raio r , de uma fonte pontual e em meio não absorvente, a intensidade pode ser dada pela Equação 1 ^[22].

$$I = \frac{S}{4\pi.r^2} \quad (1)$$

Em que:

I - intensidade UV num ponto;

S - energia total emitida pela fonte;

r - raio desde a fonte pontual.

Dose ultravioleta (dose): O termo dose de radiação ultravioleta é frequentemente utilizado na literatura para representar a exposição de um dado organismo à irradiação na faixa germicida. A dose ultravioleta é definida como o produto da intensidade pelo tempo de exposição (Equação 2). Unidades comumente utilizadas para a dose de ultravioleta são: J.m⁻², mJ.cm⁻² em Ws.cm⁻² [17].

$$D = I.t \quad (2)$$

Em que:

D - dose de radiação ultravioleta (W.h.m⁻²);

I - intensidade da radiação (W.m⁻²);

t - tempo de exposição (h).

As doses de radiação ultravioleta necessárias para inativação de microrganismos são variáveis para cada tipo de organismo e espécie. Os vírus e a maioria das bactérias são mais sensíveis à radiação ultravioleta. Porém, para protozoários e helmintos, doses mais elevadas devem ser utilizadas para inativação [21].

Absorvância e Lei de Beer-Lambert: a radiação ultravioleta não é transmitida em um meio com intensidade constante e equivalente à gerada na fonte. A partir da fonte, ocorre um efeito de atenuação devido à absorção da radiação originalmente emitida no próprio meio [23]. Com o intuito de estimar esta atenuação para efeito de projeto, é comum empregar o termo coeficiente de absorvância (α) para corrigir a absorvância do meio, através da Equação 3.

$$\alpha = A \cdot \ln(10) \quad (3)$$

Em que:

α - coeficiente de absorvância;

A - absorvância a 254 nm (cm^{-1}).

A absorvância de uma radiação luminosa (com um dado comprimento de onda) através de um líquido pode ser quantificada por espectrofotometria, obtendo a energia absorvida por unidade de profundidade [23]. A relação entre absorvância e transmitância é mostrada na Equação 4:

$$T(\%) = 100 \cdot 10^{-A} \quad (4)$$

Em que:

T - transmitância (%);

A - absorvância (cm^{-1}).

A variação da intensidade média efetiva de determinada radiação num meio pode ser descrita pela Lei de Beer-Lambert (Equação 5).

$$I_{\text{média}} = \frac{I_0}{\alpha.L} [1 - \exp(-\alpha.L)] \quad (5)$$

Em que:

$I_{\text{média}}$ – intensidade ultravioleta média efetiva;

I_0 - intensidade ultravioleta aplicada no meio líquido;

α - coeficiente de absorvância;

L - percurso óptico (cm).

Refração e Reflexão: a radiação ultravioleta obedece às leis da refração (Snell) e reflexão (Fresnel), utilizadas na física óptica da radiação visível. Entretanto, os índices de refração e reflexão variam conforme o comprimento de onda. Poucos são os materiais que apresentam uma elevada reflexividade da radiação ultravioleta e eles nem sempre são bons refletores de luz visível [24].

CAPÍTULO 04

EFEITOS DA RADIAÇÃO SOLAR NOS ORGANISMOS E NO MECANISMO DE REPARAÇÃO DE DANOS

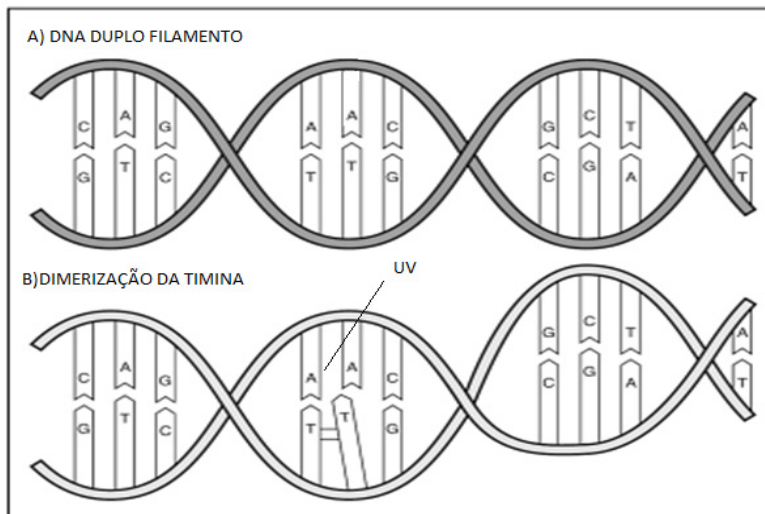
O mecanismo de inativação dos organismos patogênicos pela luz solar é resultado de um efeito combinado da radiação infravermelha (responsável pelo aquecimento da água) e da radiação ultravioleta [12].

Isso ocorre porque à medida que há um aumento da temperatura, as reações químicas e enzimáticas na célula tendem a tornarem-se mais rápidas, acelerando a taxa de crescimento. Entretanto, em determinadas temperaturas, inicia-se o processo de desnaturação de proteínas e ácidos nucleicos, inviabilizando a sobrevivência celular [25]. Assim, a ação germicida da radiação ultravioleta está associada às alterações estruturais que ela provoca no ácido desoxirribonucleico (DNA) das células [10].

O DNA é a molécula que armazena a informação genética e consiste de duas cadeias de nucleotídeos unidas pela interação das bases complementares, denominadas de bases emparelhadas, que são: Adenina e Guanina (Purinas) e Citosina e Timina (Pirimidinas) [17].

Essas bases emparelhadas são ligadas por pontes de hidrogênio fazendo com que as duas fitas do DNA permaneçam unidas, dando origem a uma dupla hélice [18]. Na Figura 3-A mostra a representação esquemática de um pedaço hipotético de uma fita de DNA, onde os nucleotídeos estão representados pelas letras A (adenina), G (guanina), C (citosina) e T (timina). Note que Adenina (A) liga-se a Timina (T) e a Guanina (G) à Citosina (C).

Figura 3 - A - DNA duplo filamento B - efeito da radiação ultravioleta sobre a cadeia de DNA da bactéria, promovendo a formação de dímeros Timina - Timina, impedindo a formação de ligações de pontes hidrogênio entre o par Timina-Adenina dos filamentos [26]



Já o ácido ribonucleico (RNA) é responsável pela formação de enzimas específicas e de proteínas estruturais. A composição do RNA é muito parecida com a do DNA, contudo apresenta algumas diferenças. As bases purinas são as mesmas contidas no DNA, mas as pirimidinas são uracila e citosina [17].

As moléculas de DNA dos organismos absorvem radiações com comprimento de onda entre 200 e 300 nm, com especial destaque em torno de 260 nm, onde ocorre a absorção máxima de radiação por seu material genético. A energia absorvida rompe as ligações não saturadas, principalmente as bases nitrogenadas pirimídicas, provocando a dimerização de pirimidinas adjacentes com rompimento dos encaixes de

filamentos de DNA (Figura 3-B). O processo de dimerização corresponde à formação de uma molécula, chamada dímero, a partir de duas menores, devido às alterações provocadas pela radiação ultravioleta.

As moléculas pirimídicas resultantes, uma vez unidas, deformam a estrutura helicoidal do DNA e dificultam a replicação do ácido nucleico. Caso a replicação ocorra, as novas células serão descendentes mutantes incapazes de se duplicar^[18]. Isso interfere na precisão da replicação, o que pode levar a erros na transcrição ou impedir a divisão celular, com consequente prejuízo ou morte celular^[18,27,28].

A formação de dímeros é o mecanismo fundamental da desinfecção ultravioleta, no entanto a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) também é reportada como mecanismo de inativação de patógenos causado pela radiação UV^[29].

As ROS são conhecidas por reagir não seletivamente com quase tudo o que entram em contato, tais como: a membrana celular, enzimas, organelas e outros [30]. Elas conseguem oxidar ácidos nucleicos, enzimas e lipídeos dos microrganismos, causando perda da função biológica e, conseqüentemente, morte celular^[31]. A indução de danos oxidativos na molécula de DNA é mais eficiente pelos comprimentos de onda na faixa UV-A^[32].

A resistência à inativação dos diferentes organismos patogênicos por radiação ultravioleta varia de acordo com a espécie. De modo geral, bactérias e vírus são muito sensíveis à radiação ultravioleta, bastando doses efetivas da ordem de 20 mWs.cm⁻² para inativar a maioria das espécies. Entretanto, o mesmo não pode ser dito de protozoários e helmintos, dotados

de proteções naturais que permitem sua sobrevivência em ambientes adversos^[18].

Ao utilizar a radiação solar como forma de desinfecção de efluentes, deve-se considerar que os microrganismos são capazes de se recuperar após a irradiação^[10].

Ao longo de seu processo evolutivo, os microrganismos desenvolveram mecanismos bioquímicos próprios capazes de recuperar lesões causadas por fontes externas, selecionando e preservando as espécies.

Conforme a literatura, quando expostos a uma dose subletal de radiação ultravioleta, os microrganismos têm a habilidade de reparar os danos causados na estrutura do seu DNA e voltar ao estado ativo em que a reprodução é novamente possível, e, através desse sistema de reparo, é possível a reversão das modificações químicas das bases de nucleotídeos, restaurando a estrutura até então danificada do seu DNA.

Os principais mecanismos de recuperação dos microrganismos irradiados com radiação ultravioleta são: a fotorreativação e a recuperação no escuro^[10,17,18,21]. Enquanto a primeira se refere à reversão direta de dímeros de timina pela enzima fotoliase na presença de radiação visível, a segunda se trata da capacidade que a maior parte das células possuem de reparar os danos induzidos ao seu DNA pela ação de várias enzimas sem nenhuma exigência de luz.

PARA MAIOR COMPREENSÃO:

Através do processo de fotorreativação e sob determinadas condições, alguns microrganismos dotados de sistema metabólico funcional são capazes de produzir uma enzima que utiliza a energia das radiações luminosas entre 300 e 500 nm para quebrar a ligação entre os dímeros de timina ^[69].

A reparação no escuro corresponde à substituição de nucleotídeos lesados pela radiação ultravioleta. Através deste mecanismo de reparo, segmentos inteiros de ácido nucleico são extraídos e, sem danificar o segmento complementar, são usados como molde para reparar e substituir o segmento danificado ^[69].

Este processo pode ser dividido em 4 etapas: (1) reconhecimento do dano; (2) abertura local do duplex de DNA no sítio da lesão; (3) incisão dupla na fita contendo a lesão; e (4) ressíntese do novo fragmento de DNA e sua ligação pela DNA ligase ^{1 [32]}.

A capacidade de um organismo para se reparar parece depender de um número de fatores, incluindo a dose, a intensidade e o tempo de exposição à radiação ultravioleta, o comprimento de onda ultravioleta, o tipo de organismo e as condições de exposição após a radiação ultravioleta ^[40].

Uma das formas de controle da fotorreativação é realizada através do aumento da dose de radiação no sistema de desinfecção. No caso de doses elevadas de radiação, a quantidade de dímeros é maior que a

capacidade de recuperação do microrganismo, não havendo tempo para reverter todas as alterações antes que se inicie a duplicação da célula^[23].

Portanto, a dose correta de ultravioleta é uma variável importante para o dimensionamento de instalações de desinfecção.

CAPÍTULO 05

FATORES QUE INFLUENCIAM A DESINFECÇÃO SOLAR

Na desinfecção solar, a redução dos microrganismos patogênicos ocorre pela ação conjunta da radiação ultravioleta e infravermelha provenientes do sol. Enquanto a primeira promove a modificação do DNA dos microrganismos, a segunda acarreta o aquecimento da água para temperatura acima de 50°C, tornando o meio incompatível para o desenvolvimento da maioria dos microrganismos patogênicos [9,33,34].

Também é interessante ressaltar que existem inúmeros fatores que influenciam a desinfecção, os quais são abordados a seguir neste capítulo.

Características das águas residuárias

Dentre as características das águas residuárias que tem importância para a desinfecção, tem-se:

- Vazão
- Sólidos Suspensos e coloidais
- Concentração inicial de bactérias
- Alguns contaminantes*

* Podem restringir a transmissão da radiação ultravioleta através da água, reduzindo a dose que deveria atingir os microrganismos.

Os contaminantes incluem turbidez, ferro, ácido húmico e fúlvico, além de partículas em suspensão, que podem abrigar microrganismos que interferem na qualidade do tratamento [35].

Quanto maior a concentração destes compostos no efluente, menor a disponibilidade de radiação ultravioleta e sua consequente absorção pelos organismos[23]. O Quadro 1 apresenta alguns compostos químicos presentes nos esgotos domésticos e respectivos efeitos na desinfecção por radiação ultravioleta.

Quadro 1 - Características das águas residuárias domésticas e respectivos efeitos na desinfecção por ultravioleta [16].

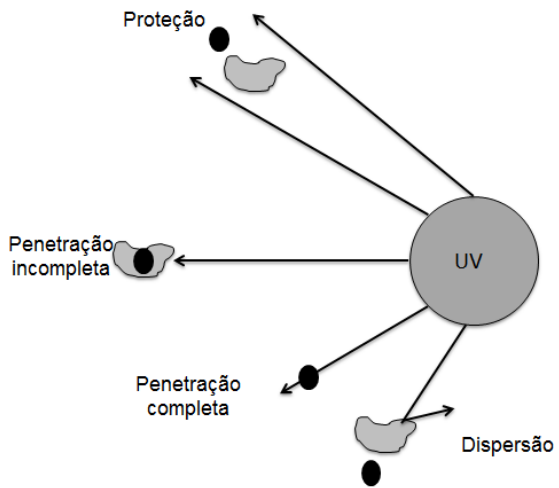
CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS	EFEITOS NA DESINFECÇÃO COM RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA
Amônia, nitrito e nitrato	Pouco efeito
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Pouco efeito. Mas, se grande parcela da DBO é caracterizada por composto húmicos e, ou insaturados (ou conjugados), a transmitância pode ser diminuída.
Dureza	Afeta a solubilidade dos metais que podem absorver luz ultravioleta.
Substâncias húmicas e ferro	Alta absorbância de radiação ultravioleta.
pH	Afeta a solubilidade dos metais e carbonatos
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Absorvem a radiação ultravioleta e protegem as bactérias agregadas.

Assim, tem-se que:

- A presença de substâncias orgânicas na água não é desejável, pois além de diminuir a transmissão da radiação ultravioleta, elas podem levar à fotodegradação [36,37];
- A presença de nutrientes favorece o crescimento de algas na presença da radiação solar [38];
- A presença de íons, nutrientes e matéria orgânica, além dos efeitos relatados acima, fornece base sólida para a sobrevivência e crescimento dos microrganismos [39].

Na desinfecção de águas residuárias, a agregação ou oclusão dos microrganismos nas partículas de matéria em suspensão impede a penetração da radiação ultravioleta, o que reduz a eficiência da inativação (Figura 4). Os sólidos em suspensão presentes podem esconder bactérias patogênicas no seu interior que, assim, ficariam protegidas ou blindadas contra a radiação, impedindo que os microrganismos sejam irradiados. Por isto, a eficiência da desinfecção em amostras com turbidez elevada é bastante reduzida [12].

Figura 4 – Efeitos das partículas de matéria em suspensão na desinfecção por ultravioleta ^[18]



Os microrganismos só podem estar de forma agregada?

Uma das características da água que é de preocupação particular é a presença de partículas, sendo que em fontes de água, as partículas podem existir num estado disperso (como entidades únicas) ou sob a forma de agregados (como flocos). O mesmo princípio aplica-se também aos microrganismos, os quais podem ser dispersos (livre) ou em agregados em conjunto com outras partículas e/ou microrganismos [40].

Os microrganismos quando formam agregados entre si ou com outras partículas em condições ambientais favoráveis, garantem uma melhor assimilação dos alimentos e proteção contra estresses ambientais. Tais agregados são denominados coletivamente de flocos. Diferentes organismos presentes na água (bactérias, fungos, vírus e protozoários), juntamente com os outros constituintes orgânicos e inorgânicos formam flocos em uma rede polimérica, mantendo-se juntos [40].

Em relação à turbidez, esta é utilizada como parâmetro para caracterizar as propriedades ópticas dos líquidos que contém partículas em suspensão, provocando absorção e desvio da radiação. O aumento da turbidez e da profundidade da água leva a uma menor eficiência do processo de desinfecção, se considerado um tempo fixo de exposição [6].

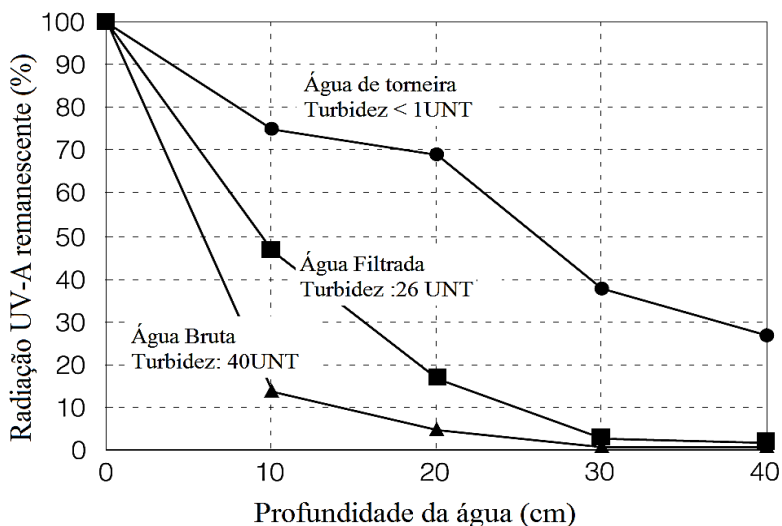
Águas mais turvas demandam maior tempo de exposição para efetiva desinfecção, ou, dependendo da intensidade da turbidez, não serão passíveis de desinfecção eficaz. Nesses

casos a remoção dos sólidos suspensos pode ser realizada por meio da filtração, apesar de isso aumentar os custos envolvidos no tratamento^[41].

Aumentando-se a profundidade da água, a quantidade de radiação apta a atravessar a coluna total de água também reduz, devido à dispersão da radiação ultravioleta. A quantidade de radiação atenuada por este efeito varia com o comprimento de onda, por exemplo, para comprimentos de onda que vão de 200 a 400 nm, a redução na intensidade não atinge 5% por metro de profundidade de água; no entanto, para comprimentos de onda mais longos, pode chegar a até 40% por metro de profundidade^[42].

Assim, é possível entender que a profundidade da lâmina d'água adotada no recipiente interfere de forma significativa no tempo necessário para completa inativação dos organismos patogênicos.

A Figura 5 ilustra a fração de radiação remanescente dentro de uma coluna de água para uma determinada profundidade de água, variando com a turbidez, por exemplo, para uma profundidade de 0,10 m e com turbidez de 26 UNT, a radiação UV-A é reduzida pela metade^[43].

Figura 5 – Efeito da turbidez e profundidade da água na desinfecção solar ^[43]

Apesar do efeito negativo da turbidez, em testes realizados sob condições controladas, observa-se que, mesmo com elevada turbidez (~ 110 UNT) e elevado grau de contaminação (109 UFC.100 mL⁻¹), a eliminação total de coliformes é alcançada em dia ensolarado, na cidade de Brasília, com um tempo de exposição de duas horas e temperatura da água de 50°C. A temperatura da água atinge 50°C após duas horas de exposição e permanece acima dessa temperatura por mais de três horas ^[44].

Utilizando-se de amostras de água com turbidez de 300 UNT em recipientes PET de 500 mL é atingida a total destruição de *E. coli* em um período de 8,5 horas para dias totalmente ensolarados na Malásia (radiação média de 956 W.m⁻²). Já para dias nublados (média de 190 W.m⁻²), apenas as amostras com 100 UNT são completamente inativadas, ocorrendo ainda

o recrescimento bacteriológico após 24 horas. A turbidez elevada da água, além de diminuir a inativação bacteriana, também pode facilitar o recrescimento bacteriano. Por isso é interessante realizar um processo de filtração ou decantação anterior à exposição solar [45].

Pesquisas desenvolvidas no Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB mostraram boa inativação de coliformes termotolerantes por radiação ultravioleta em efluentes com 20 mgL⁻¹, 30 mgL⁻¹ e 40 mgL⁻¹ de SST [10]. Todavia recomenda-se que a concentração de sólidos suspensos totais não deve exceder a 30mg/L para que a radiação emitida atinja o microrganismo [16,43].

Examinando partículas com características diferentes (partículas de argila inorgânica, ácidos orgânicos e partículas de lodo ativado) e seus efeitos de proteção aos vírus na desinfecção por ultravioleta, é possível evidenciar a importância da composição da partícula dos flocos na inativação ultravioleta.

O grau mais elevado de proteção é referente às partículas orgânicas de ácidos húmicos, seguido por partículas de lodo ativado, enquanto que as partículas de argila não ofereceram nenhuma proteção significativa.

O efeito de proteção nas partículas de lodos ativados foi atribuído ao seu material orgânico, e a maior proteção foi observada nas partículas de ácidos húmicos possivelmente, devido ao seu maior grau de pureza de conteúdo orgânico. Os resultados sugerem que a composição química de partículas (por exemplo, partículas com conteúdo orgânico com elevada absorção à ultravioleta) pode ser um fator crítico para a sobrevivência dos vírus associado a partículas durante a desinfecção [46].

A fim de investigar o impacto das características da qualidade da água na inativação de *E. coli* sob exposição à radiação solar direta, foi realizado um experimento empregando águas sintéticas com características variadas. Os dois principais componentes da qualidade da água investigados incluíram a cor (que foi variada por ajustamento da concentração de ácido húmico) e a turbidez da água (que foi ajustada por meio da adição de partículas de argila, constituída, especialmente, por caulim). Em águas com cor elevada verificou-se que a inativação bacteriana após sete horas de exposição ao sol foi inversamente proporcional à concentração de ácido húmico. Nas águas em que o ácido húmico não foi adicionado, o número de *E. coli* foi reduzido em 5,8 unidade log ^[47].

Em relação à turbidez não se observou evolução entre a inativação de *E. coli* e a quantidade de partícula inorgânica, nos níveis de turbidez testados (que variaram de 25 a 200 UNT). Com base nos resultados obtidos no experimento concluiu-se que a cor e o teor de matéria orgânica dissolvida da água tem forte impacto sobre a desinfecção solar, sendo este maior que a presença de partículas inorgânicas, o que implica dizer que, mesmo que a água tenha nível de turbidez muito abaixo do nível recomendado pelo SODIS (< 30 UNT), se ela contém elevada concentração de matéria orgânica natural, a desinfecção completa não pôde ser atingida após 6 horas de exposição à radiação solar ^[47].

Presença de oxigênio

O efeito bactericida da radiação solar na água depende também do nível de oxigênio dissolvido. Este está presente na água durante a exposição à luz solar produz espécies reativas de oxigênio, como $\text{OH}\cdot$, H_2O_2 e O^2 [48].

O peróxido de hidrogênio, por sua vez, através da catálise, pode ser convertido em radical hidroxila ($\text{OH}\cdot$), que apresenta reatividade inferior apenas ao flúor [49]. Essas espécies químicas são altamente oxidantes e têm grande importância na desinfecção, auxiliando a inativação de microrganismos através do processo chamado de desinfecção foto-oxidativa solar (***solar photo-oxidative disinfection***). Apesar de não apresentar efeitos residuais, quando a água é retirada da presença de radiação, o tempo de exposição necessário para inativação de microrganismos é reduzido, como no caso de *E. coli* [50].

Apesar desses radicais serem muito reativos, eles possuem curto período de vida, limitando sua eficiência no processo de desinfecção [51].

Através de estudo sobre a influência da agitação manual de amostras de água submetidas à desinfecção solar na eficiência de inativação de coliformes termotolerantes, observou-se que recipientes com e sem agitação prévia foram expostos à radiação solar no horário das 9 às 15 horas (seis horas no total) e foram analisados o teor de oxigênio dissolvido e nível populacional de coliformes termotolerantes de hora em hora. Com a agitação manual, houve oxigenação considerável nas amostras de água (máxima concentração de OD de $6,61 \text{ mgL}^{-1}$ nas amostras de água agitadas e de $5,56 \text{ mgL}^{-1}$

nas amostras sem agitação), porém o aumento do teor de oxigênio dissolvido na água não teve efeito significativo sobre a inativação dos coliformes termotolerantes ($p > 0,05$) [52].

A concentração de oxigênio na água pode chegar a influenciar significativamente no processo de desinfecção e a reduzir o tempo de exposição solar de cinco horas para quatro horas na desinfecção total da água, sob uma temperatura média de 50 °C e intensidade solar média acima de 800W.m⁻². Utilizando recipientes PET e realizando agitação manual, a desinfecção total pode chegar a 100% e ainda não apresentar recrescimento bacteriano após 48 horas de confinamento [53].

Todavia também existe discordância na literatura em relação à agitação dos recipientes, pois há trabalhos que concluem que a agitação dos frascos durante a exposição aos raios solares não é vantajosa e pode prejudicar o processo de desinfecção. O equilíbrio nos níveis de oxigênio é inversamente proporcional à temperatura da água e a agitação causa um equilíbrio imediato entre a água e o ar preso no recipiente. Como resultado, os níveis de oxigênio dissolvido diminuem a uma taxa muito mais elevada em amostras agitadas enquanto que amostras não agitadas tendem a conservar os seus níveis de oxigênio dissolvido. Isso demonstra que os benefícios da agitação vêm apenas após a coleta da água ou no início da exposição solar, quando, dependendo da fonte, a água pode ter baixos níveis de oxigênio devido a fatores ambientais, garantindo assim um nível de oxigênio satisfatório para iniciar o processo de desinfecção. No tempo zero, a temperatura é geralmente a mínima e, por conseguinte o nível de oxigênio será o máximo [45].

Temperatura e tempo de exposição solar

Os microrganismos apresentam uma faixa de temperatura onde se desenvolvem plenamente, sendo possível que se possa determinar as temperaturas mínima, ótima e máxima. Dessa forma, eles ficam mais sensíveis à temperatura quando ela atinge uma faixa superior à máxima de crescimento microbiano (que, em geral, é levemente superior a aproximadamente 45°C) [25].

Em temperaturas elevadas, além da diminuição das funções enzimáticas, devido a desnaturação das proteínas, ocorre também o aumento da permeabilidade da membrana [54].

Os agentes patogênicos que afetam os seres humanos são adaptados para viverem nos intestinos de pessoas, onde encontram um ambiente úmido, escuro e temperaturas que variam entre 36°C e 37°C [12].

A *E.coli*, por exemplo, quando cultivada em um meio complexo, apresenta temperatura ótima, máxima e mínima a 39°C, 48°C e 8°C, respectivamente. Entretanto, esses valores podem sofrer ligeiras alterações nas diferentes linhagens e em relação aos meios utilizados para o cultivo [54].

A bactéria *E. coli* tem sua temperatura máxima de crescimento a aproximadamente 48°C, e em qualquer temperatura acima disso, ela não consegue sobreviver. Por isso, não é surpreendente que os estudos a seu respeito têm constatado que a inativação de *E. coli* e outras bactérias por radiação solar seja mais eficaz a temperaturas superiores à faixa 45 - 50°C [55].

Já fora do corpo humano, a maioria dos microrganismos patogênicos são muito sensíveis, não toleram temperaturas elevadas e nem possuem mecanismos de proteção à radiação

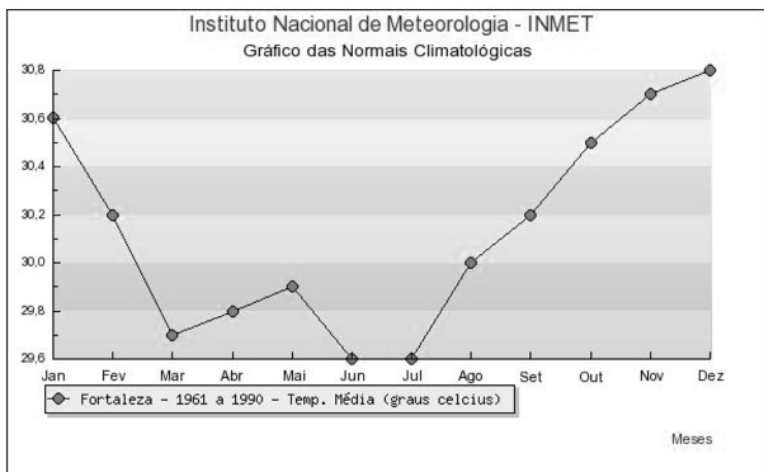
ultravioleta, e como não podem multiplicar-se, acabam morrendo [12].

Em relação à temperatura ideal para inibir o crescimento de microrganismos, convém ter cautela quando se estabelece um valor, já que a temperatura de inibição está relacionada com a espécie de microrganismo [56].

Na água, mesmo com algumas bactérias particularmente resistentes ao calor por terem a capacidade de formar esporos, em geral pode-se afirmar que a maioria das bactérias morrem entre os 40 e 100°C, enquanto as algas, protozoários e fungos morrem entre os 40 e 60°C [57].

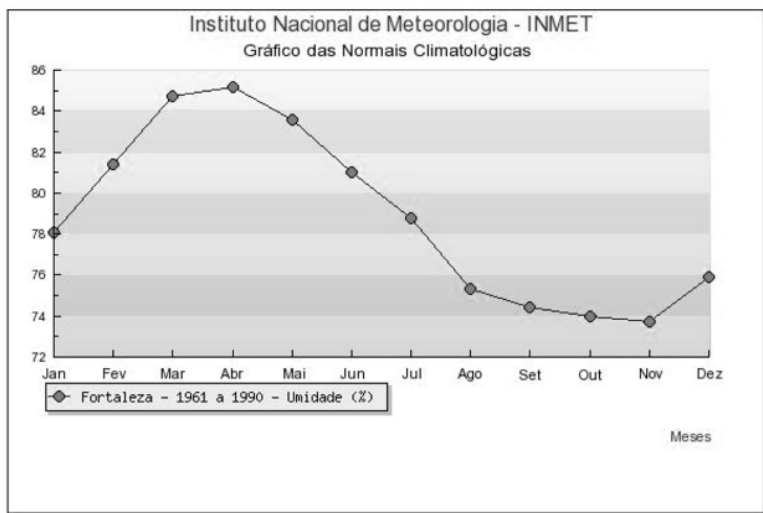
Logo abaixo estão os gráficos climatológicos referentes às variáveis climáticas da cidade de Fortaleza-CE (uma das maiores capitais brasileiras), todos obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 6 – Gráfico climatológico de temperatura média mensal de Fortaleza no período 1961-1990 [58].



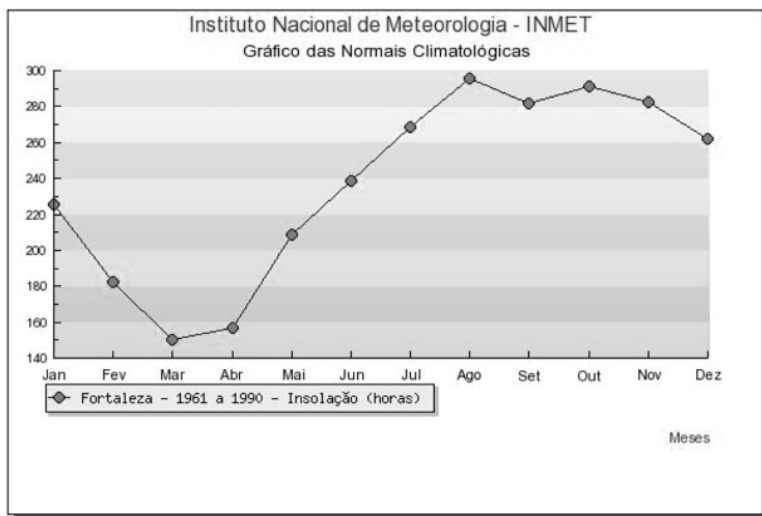
Localizada na região nordeste do Brasil, Fortaleza é uma cidade de clima ameno, possuindo temperatura anual média de 26,6 °C, de acordo com o INMET (2016), podendo chegar aos 27,3 °C de média das máximas em novembro, e aos 26,0°C de média das mínimas em agosto (Figura 7). Além disso, a Figura 21 registra que existe uma diminuição da temperatura geralmente no meio do ano, compreendendo o período mensal equivalente a junho e julho.

Figura 7 – Gráfico climatológico de umidade mensal de Fortaleza no período 1961-1990 ^[58]



A umidade média anual da cidade está em torno de 78,8%, sendo que em abril a umidade relativa alcança um nível de até 85,2% (INMET, 2016).

Figura 8 – Gráfico climatológico de insolação mensal de Fortaleza no período 1961-1990 ^[58]



Observando a Figura 8, alusiva à insolação, verifica-se que o período de maior exposição ao sol da cidade de Fortaleza é o período que compreende de junho a outubro, sendo a exposição solar média anual de 2.843,4 horas, conforme os registros do INMET em série histórica.

No caso desinfecção solar em efluentes para eliminação de microrganismos nas águas, após 12 horas de exposição solar, ocorreram reduções de 99,9% e 100% nos números de coliformes totais e *E. coli*, respectivamente. Para confirmar a eficiência do processo, foi constatada a ausência de recrescimento de todos os microrganismos pesquisados após 12 horas de exposição ao sol ^[59].

O ponto de morte térmica dos cistos de amebas e giárdias é de 57 °C (durante 1 minuto de exposição), ou seja, a exposição ao sol em recipientes PET destrói esses agentes patogênicos

se a água atinge a temperatura de 57 °C durante 1 minuto ou se água mantém uma temperatura de 50° C durante 1 hora [12].

Quando as temperaturas não atingem 50°C, a diminuição no número de bactérias e esporos é muito menor. Essa redução é menor quando há calor sem a ação ultravioleta do que na presença de calor e radiação ultravioleta. Dessa forma, alcançar uma temperatura suficientemente alta, 55 °C ou superior, durante várias horas, é um fator importante para a inativação microbiana por sistemas de desinfecção solar [7].

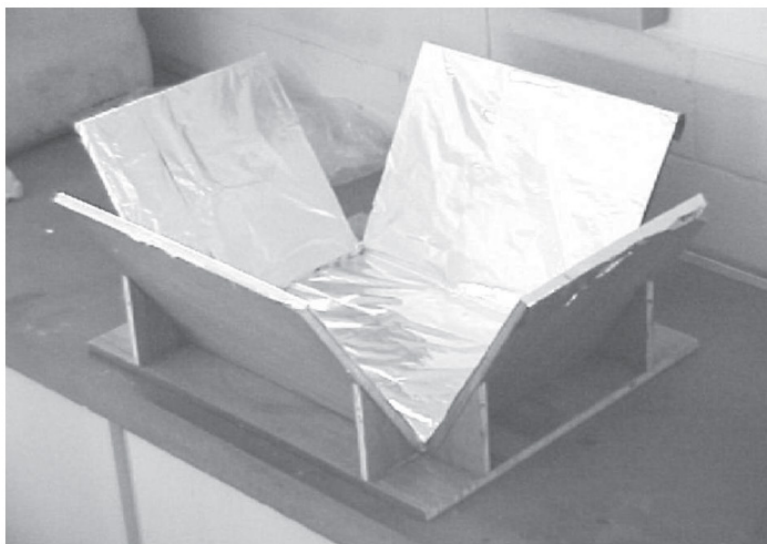
Alguns procedimentos podem ser citados, no intuito de potencializar o aquecimento da água, tais como: usar o recipiente PET com a metade inferior pintada de preto, o que permite obter temperaturas cerca de 5°C maiores na água, em comparação com os recipientes sem pintura [12]. Outro método utilizado são os concentradores solares e a adição de fotocatalíticos. Estes concentradores são construídos em material simples, com chapas de aço ou placas de madeira com formato retangular, quadrado ou parabólico e revestidos com material refletor (alumínio, papel espelhado, folha de alumínio).

O Instituto Mexicano de Tecnologia de Água (IMTA), propõe um concentrador solar, construído com material simples, como chapas de aço ou placas de madeira revestidas com papel alumínio, no qual pode-se colocar até três recipientes PET simultaneamente para desinfecção. Com o uso do concentrador reduzem-se duas horas de exposição solar e atinge-se uma eficiência de 99,99% de inativação de coliformes totais. Sem o uso do concentrador são necessárias seis horas de exposição para a mesma remoção bacteriológica [60].

O uso do concentrador solar proposto pelo IMTA permitiu reduzir o tempo de exposição ao sol de seis para quatro

horas, sem prejuízo na eficiência da desinfecção solar. Mesmo com duas horas de exposição a menos, o concentrador solar inativou 99,89% de coliformes totais e 100% de *E. coli* para quatro horas de exposição, enquanto que sem o uso do concentrador a eficiência foi de 99,56% para coliformes totais e 96,48% para *E. coli* em seis horas de exposição ao sol. Adicionalmente, com o uso do concentrador, puderam-se atingir temperaturas de até 70°C, ou superior ^[61].

Figura 9 – Concentrador solar montado com revestimento de papel alumínio ^[61]



Diferenças na velocidade de inativação de bactérias a temperaturas entre 12° e 40 °C são insignificantes, mas quando a temperatura sobe para 50°C, a ação bactericida aumenta, provavelmente devido ao efeito sinérgico entre radiação e temperatura ^[62].

Conclui-se que a temperatura como único agente desinfetante não é capaz de inativar o vírus, porém amplifica significativamente o efeito da radiação sobre o microrganismo. Parece óbvio também, que, sob condições de temperatura mais elevada, o efeito da temperatura por si só passe a ser significativo [41].

Para que a temperatura desempenhe um papel na desinfecção solar, é necessário que pelo menos 45 °C. A partir desta temperatura, observou-se inativação de *E. coli*, cuja concentração era de 10^6 UFCmL⁻¹, além de que não se registrou recrescimento bacteriano durante 24 e 48h de armazenamento sob temperatura ambiente. Normalmente, nenhuma inativação completa ocorre em temperaturas abaixo de 40°C [63].

Já no processo de desinfecção solar com temperaturas superiores a 45°C, ocorre a interação sinérgica entre a temperatura elevada e radiação solar, elevando a eficiência de desinfecção e reduzindo o tempo de tratamento [64]. Além disso, quando a temperatura da água excede 45°C, é possível inativar completamente bactérias mesmo em águas com elevada turbidez (100 UNT) [63].

Também existe estudo que evidencia a completa inativação bacteriana (<1 UFC/100 mL⁻¹ para água potável), mesmo com a água não atingindo temperaturas acima de 45°C [65].

Dose de radiação ultravioleta

O termo dose de radiação ultravioleta é utilizado para representar a exposição de um dado organismo à irradiação na faixa germicida. A eficácia da desinfecção ultravioleta é baseada no tempo de exposição e na intensidade da radiação, obtendo-se como produto a dose de radiação ultravioleta ^[40].

Uma maior eficácia da aplicação de uma alta intensidade ultravioleta durante um curto período de tempo é preferível ao invés de aplicação de uma intensidade mais baixa durante um período de tempo mais longo.

A quantidade de energia necessária para a desinfecção solar não é um valor que pode ser instituído em horas de exposição, mas sim como um valor que deve ser estabelecido em função da fluência acumulada. Esta fluência acumulada refere-se à quantidade total de energia aplicada por unidade de área em relação ao tempo de exposição ($W.m^{-2}$), dependendo principalmente da época do ano e da latitude ^[11].

A Tabela 1 apresenta as doses de radiação ultravioleta necessárias para inativação de alguns microrganismos patogênicos prejudiciais aos seres humanos.

Tabela 1 – Doses de radiação ultravioleta para inativação de alguns microrganismos patogênicos aos seres humanos [66]

	Microorganismo	Dosagem necessária (mWs. cm ⁻²)	
		Inativação de 90%	Inativação de 100%
Bactéria	- <i>Bacillus paratyphosus</i>	3.200	6.100
	- <i>Clostridium tetani</i>	12.000	22.000
	- <i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3.400	6.500
	- <i>Eberthella typhosa</i>	2.100	4.100
	- <i>Escherichia Coli</i>	3.000	6.600
	- <i>Legionella pneumophila</i>	380	2.760
	- <i>Mycobacterium tuberculosis</i>	5.400	10.000
	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.500	10.500
	- <i>Pseudomonas fluorescens</i>	3.500	8.600
	- <i>Salmonella enteritidis</i>	4.000	7.600
	- <i>Salmonella typhimurium</i>	8.000	15.200
	- <i>Sarcina lutea</i>	17.900	26.400
	- <i>Shigella dysenteriae</i>	1.700	3.400
	- <i>Staphylococcus aureus</i>	4.950	6.600
	- <i>Streptococcus viridans</i>	2.000	3.800
Vírus	-Bacteriófago da <i>E. coli</i>	3.600	6.600
	-Influenza	3.600	6.600
	-Poliovírus 1	28.000	42.000
Protozoários	- <i>Giardia lamblia</i>	63.000	-
	- <i>Paramecium sp</i>	110.000	220.000
Nemátodo	-Ovo	51.00	92.000
Fungos	-	24.000	45.000

A inativação permanente ocorre através da inibição da cadeia respiratória da célula. Logo após a exposição à radiação UV-A ou à radiação solar, uma célula consome rapidamente toda a sua Adenosina trifosfato (ATP), provavelmente em processos de recuperação ou na manutenção do potencial de membrana da célula. Segue-se um período de aumento da atividade de captação de glicose, consistente com a necessidade da célula de produção contínua de ATP. A síntese deficitária de ATP torna insustentável a manutenção do potencial de membrana, resultando em sua despolarização [67,68].

Efeito da radiação ultravioleta em relação ao tipo de organismo

As taxas de inativação microbiana variam dependendo dos seguintes fatores [69]: comprimento de onda de radiação ultravioleta, tipo de microrganismo, e população microbiana.

Como dito anteriormente, o comprimento de onda com maior eficácia bactericida é o de 254 nm, todavia este tipo de radiação inserido na faixa UV-C não atinge a superfície terrestre, em decorrência da camada de ozônio, que filtra essa radiação [41].

Diferentes microrganismos requerem distintas intensidades de radiação ultravioleta para a sua inativação, sendo que o grau de inativação é uma função do tempo de exposição e da intensidade de irradiação, ou seja, da dosagem, usualmente expressa em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ [70].

Em geral, as bactérias são menos resistentes à radiação ultravioleta a 254 nm do que os vírus, os quais, por sua vez, podem ser menos resistentes do que os esporos bacterianos.

Cistos de protozoários e oocistos, assim como os ovos de vermes, são considerados os agentes patogênicos microbianos mais resistentes à radiação ultravioleta a 254 nm [69].

As bactérias gram-positivas são mais resistentes do que as gram-negativas e as formas esporuladas são mais resistentes quando comparadas às espécies bacterianas em seu estado vegetativo [30].

As bactérias gram-negativas são de sensibilidade semelhante à *E.coli*, com a exceção da *Vibrio cholerae*, à qual é significativamente mais resistente. *Pseudomonas aeruginosa* (responsável por infecções nos olhos e orelhas) e *Enterobacter cloacae* (bactéria causadora de infecções urinárias e respiratórias) exigem metade da energia ultravioleta em comparação com a *E.coli*. As espécies de *Shigella*, relacionadas a diarreia e disenteria, e *S.enteritidis* (gastroenterite), também são relativamente fáceis de inativar em comparação com *E.coli*, embora a *S.typhimurium* e a *Shigella sonnei* sejam ligeiramente mais resistentes [62].

Nas condições usuais de exposição, a radiação ultravioleta se mostra mais eficiente para a eliminação de bactérias e vírus patogênicos. Entretanto, o mesmo não pode ser dito de protozoários e helmintos, dotados de proteções naturais que permitem sua sobrevivência em condições ambientais adversas [71,72,73].

Em relação à cinética de inativação ultravioleta de vírus, bactérias e protozoários, o processo é eficaz contra todos os microrganismos patogênicos relevantes para as práticas atuais de água potável. A maioria dos organismos resistentes são os vírus, especificamente Adenovírus, e esporos bacterianos, tal como o protozoário *Acanthamoeba* que também se mostrou

bastante resistente aos raios ultravioletas. Já bactérias e cistos de *Cryptosporidium* e Giardia são mais suscetíveis [74].

O estado fisiológico dos microrganismos também é um fator capaz de afetar a sua resistência à radiação ultravioleta, uma vez que se relaciona à sensibilidade ao estresse ambiental. Em geral, a sensibilidade à radiação ultravioleta foi relacionada com a fase de crescimento das bactérias, com a maior sensibilidade na fase de crescimento ativo e menor sensibilidade na fase estacionária [74].

Distribuição da radiação solar e condições climáticas

A eficiência do processo de desinfecção solar depende diretamente da quantidade de radiação solar disponível. A radiação solar é, porém, distribuída de modo desigual e varia em intensidade de um local geográfico para outro dependendo da latitude, estação e hora do dia [7].

Os microrganismos patogênicos são vulneráveis a dois efeitos da luz solar: radiação no espectro da luz no comprimento de onda 320-400 nm (R-UVA) e radiação infravermelha (calor), sendo que a combinação destes dois efeitos torna o efeito em conjunto maior que a soma dos efeitos separados^[12].

A radiação solar é composta de diferentes comprimentos de onda, cada qual com sua energia específica, sendo constituída da seguinte forma: 8,3% do total da radiação solar corresponde à radiação ultravioleta, seguido de 38,9% localizado na região do visível e cerca de 52,8% infravermelha [75] (Tabela 2).

De acordo com a *Environmental Protection Agency* – EPA, o sol emite energia sobre um amplo espectro de

comprimentos de onda, e dentro desse espectro, tem-se tanto a radiação infravermelha (luz visível) quanto a ultravioleta (UV), as quais não se pode ver ou sentir. Conforme a agência, existem três tipos de classificação para a radiação UV, a saber: UV-A (cujo comprimento de onda está na faixa 320-400 nm, sendo esta não absorvida pela camada de ozônio), UV-B (com comprimento na faixa 290-320 nm, e com bastante absorção pela camada de ozônio, porém ainda transpassando um pouco para a superfície terrestre) e UV-C (com comprimento de 100-290 nm, e sendo totalmente absorvida pela camada de ozônio e atmosfera) [76].

Tabela 2 – Distribuição da irradiância solar que atinge o topo da atmosfera [75].

Faixa de comprimento de onda (nm)	Irradiância (Wm⁻²)	% do total
UV-C (< 280)	6,4	0,5
UV-B (280-315)	21,1	1,5
UV-A (315-400)	85,7	6,3
Visível (400-700)	532,0	38,9
Infravermelho (>700)	722,0	52,8

Logo, nem toda a radiação emitida pelo sol chega à superfície terrestre. Grande parte da radiação, quando atinge a atmosfera, é absorvida, refletida ou difundida pelos gases atmosféricos, vapores e pequenos particulados encontrados no ar.

Aproximadamente 50% da radiação emitida pelo sol consegue penetrar e atingir a superfície terrestre. O nitrogênio e oxigênio são responsáveis pela absorção da radiação de comprimento de

onda pequeno, raios gama, raios-X e ultravioleta abaixo de 200nm [41]. Da radiação recebida, 30% são refletidos para o espaço e 47% são absorvidos pela atmosfera, mares e áreas continentais, mantendo a temperatura ambiente. Os restantes 23% mantem a convecção atmosférica e o ciclo hidrológico [77].

A camada de ozônio controla a passagem de radiação, absorvendo os raios ultravioletas entre 200 a 300nm (UV-C e UV-B). Sendo assim, o efeito bactericida solar corresponde à radiação UV-A.

Parte da radiação de comprimento de onda longo (acima de 700nm), radiação vermelha e infravermelha, é absorvida em algumas extensões pelo dióxido de carbono, ozônio e água, presente na atmosfera na forma de vapor e gotas condensadas [78]. De fato, as gotas de água presentes nas nuvens não somente absorvem os raios de comprimento de onda longa, mas também espalham a radiação solar do comprimento de onda curta.

Sabendo que a radiação solar que atinge a superfície terrestre sofre processos de reflexão e absorção, pode-se classificá-la como radiação direta e difusa. A composição destas duas radiações resulta na chamada radiação solar global. A radiação solar direta é aquela que é transmitida, diretamente, à superfície terrestre em feixes paralelos, sem sofrer nenhum processo de reflexão ou absorção. É possível observar facilmente a radiação direta olhando diretamente para o sol. Em dias de céu claro, cerca de 80 a 90% da radiação solar que atinge a superfície é radiação direta. Em contrapartida, em dias nublados, a radiação direta é praticamente nula [79].

A segunda componente da radiação, a saber, a radiação difusa, é o resultado do espalhamento dos raios solares ao incidir sobre algum tipo de partícula na atmosfera. É,

portanto, a radiação solar incidente na superfície após ter sua direção modificada por processos de refração e reflexão que acontecem na atmosfera [80].

Em dias ensolarados com céu claro, a porcentagem de radiação difusa é de apenas 10%, ao passo que para dias nublados com nuvens densas e pesadas, este valor pode subir de forma significativa, reduzindo a radiação total incidente ao nível do solo, já que as nuvens são um obstáculo à propagação da radiação solar [9]. Em dias completamente nublados, a intensidade da radiação UV-A pode reduzir em até um terço do seu valor [78].

A variação sazonal da intensidade de radiação UV-A solar depende da latitude do local, sendo o principal parâmetro para determinar o clima de uma área. Portanto, as mudanças na intensidade de incidência de radiação solar afetam, diretamente, a eficiência da desinfecção solar e devem ser consideradas antes da utilização deste processo de desinfecção [12].

Além disso, a incidência solar também está sujeita a alterações diárias devido às condições de nebulosidade. A presença de nuvens diminui a intensidade solar, e conseqüentemente influencia na eficiência do processo de desinfecção, prolongando o tempo de necessidade de exposição solar.

A disponibilidade de energia solar pode ser até três vezes menor quando o céu está nublado e assim, em dias de céu completamente coberto por nuvens, a disponibilidade de energia solar não é suficiente para atingir a temperatura necessária e de forma constante [81].

A inativação média de bactérias do grupo coliformes totais foi 3,29% maior no processo realizado com céu aberto

para o tempo de exposição de 4 horas do que em dias com nuvens. Para o tempo de exposição de 6 horas a diferença na eficiência diminuiu, chegando a 99,992% (valor residual médio $1,1 \text{ NMP100mL}^{-1}$) nos dias com céu aberto e a 99,6% (valor residual médio 56 NMP100mL^{-1}) nos dias com nuvens, diferença de apenas 0,392% [61].

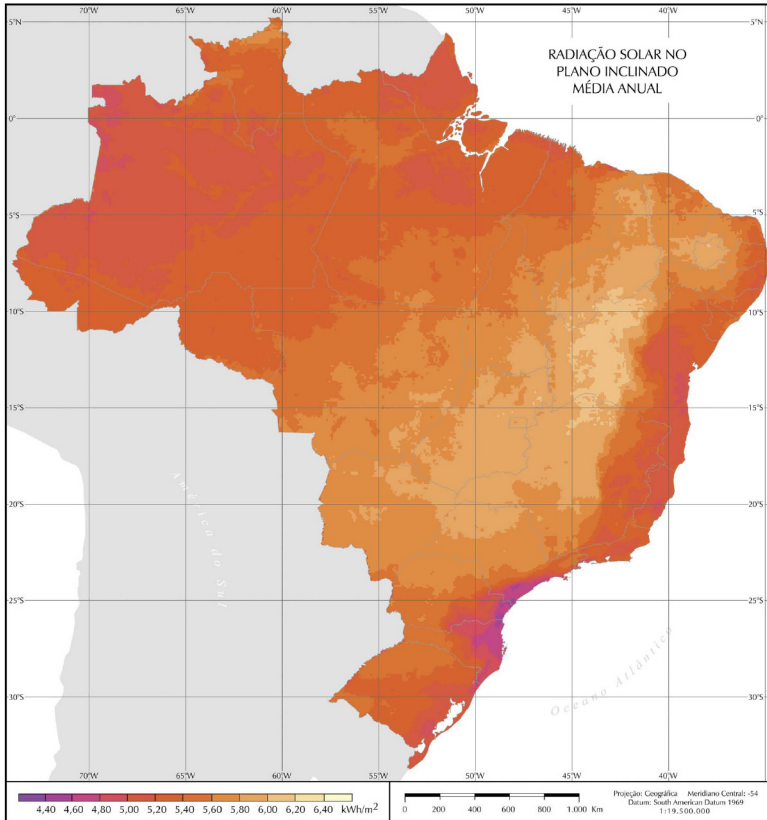
Foi verificada a eficiência da desinfecção solar no Haiti e observou-se que o processo de desinfecção solar é eficiente durante todo o ano, exceto quando há presença de nuvens e temperaturas mais baixas [82].

As regiões mais favoráveis ao uso da radiação solar na desinfecção, ficam situadas entre a latitude 15°N e 35°N (como também 15°S e 35°S). Estas regiões semiáridas são caracterizadas por receber mais radiação solar, sendo 90% dela radiação direta devido à baixa nebulosidade e baixa pluviosidade (inferior a 250 mm por ano). Além disso, geralmente são regiões que recebem mais de 3.000 horas de radiação solar por ano. A segunda região mais apropriada, situa-se entre o equador e latitude 15°N e 15°S . Estas regiões caracterizam-se pela alta umidade e cobertura de nuvens frequente, de modo que a proporção de radiação dispersa é alta. Em média, essas áreas recebem 2.500 horas de sol por ano [78].

É importante destacar que a maioria dos países em desenvolvimento se encontram dentro das zonas mais favoráveis, entre 35°N e 35°S , considerados áreas com incidência solar concentrada [83]. Portanto, esses países podem utilizar a radiação solar como fonte constante de energia, que pode ser explorada a baixo custo para inúmeras aplicações, incluindo a desinfecção solar [19].

O Brasil, por ser um país situado majoritariamente na região intertropical, insere-se numa área com condições excelentes de insolação, favorecendo o aproveitamento da energia solar durante todo o ano ^[84]. A Figura 10 mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se notar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo o país. O valor máximo de irradiação global ($6,5 \text{ kWhm}^{-2}$) ocorre no norte do Estado da Bahia, próximo à fronteira com o Estado do Piauí. A menor irradiação solar global – $4,25 \text{ kWhm}^{-2}$ – ocorre no litoral norte de Santa Catarina. É importante ressaltar que mesmo as regiões com menores índices de radiação apresentam grande potencial de aproveitamento energético ^[85].

Figura 10 – Média anual de irradiação solar global [84].



A área geográfica é considerada adequada para a desinfecção solar quando recebe 3 a 5 horas da radiação solar global acima 500 W.m^{-2} [86]. Além disso, sabe-se que uma temperatura do ar maior do que 20° C pode melhorar o processo e, em temperaturas acima de 45° C , um forte efeito sinérgico entre os processos ópticos e térmicos foi descrito por diversos autores [55,63,64].

Além dos fatores climáticos citados acima, a temperatura do ar e o vento também influenciam a temperatura da água, o que provoca um impacto direto na eficiência do processo.

As pequenas partículas existentes no ar, tais como poeira, gotas de água e moléculas de gás, atuam como um filtro pelo qual a radiação é irradiada em todas as direções, prejudicando, desta maneira, o método. Com a presença de ventos, o número de partículas de terra e poeira no ar aumenta e, portanto, podem limitar a radiação ^[87].

RESUMINDO

Os efeitos de vários fatores que influenciam a inativação microbiana por desinfecção solar estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores que influenciam a inativação microbiana por desinfecção solar da água[7].

Fator	Influência na inativação microbiana
Microrganismo	Os microrganismos diferem na sensibilidade à inativação pelo calor e pela radiação ultravioleta. O calor é mais eficaz contra bactérias vegetativas, vírus e protozoários do que contra bactérias esporuladas e ovos de helmintos. Já a radiação ultravioleta é mais eficaz contra formas vegetativas de bactérias e protozoários do que contra vírus e bactérias esporuladas.
Recipiente/frasco	Tipo, composição, volume e profundidade do recipiente influenciam a temperatura da água e a penetração da radiação ultravioleta na água.
Luz solar, ambiente e Temperatura	A intensidade e duração da radiação solar, e a nebulosidade do céu influenciam na temperatura da água e na penetração da radiação ultravioleta. O recomendado para a inativação da maioria dos agentes patogênicos entéricos é que a água esteja a 55 °C ou mais, durante várias horas.
Superfície e reflexão	Superfícies escuras ou reflexão (proporcionada por superfícies brilhantes de painéis refletoras) influenciam a temperatura da água e a exposição aos raios ultravioleta.
Qualidade da água	A exposição à radiação ultravioleta pode ser influenciada pela presença de partículas que espalham o feixe ultravioleta, absorção por solutos e presença de sólidos que geram proteção microbiana.
Oxigenação	O aumento no teor de oxigênio na água (por agitação ou por meio mecânico) durante vários minutos em contato com o ar antes da exposição ao sol aumenta a inativação microbiana.
Tempo de exposição	A temperatura da água e a duração da exposição à temperatura elevada, assim como a dose ultravioleta cumulativa irão influenciar no tempo de desinfecção, podendo variar em algumas horas em pleno sol ou até dois dias em luz solar parcial.

CAPÍTULO 06

LIMITAÇÕES DO USO DA RADIAÇÃO SOLAR PARA DESINFECÇÃO DE EFLUENTES

Em qualquer experimento em que haja fundamentação científica para o estudo de um determinado método, deve-se não somente conhecer suas vantagens, mas também suas limitações. Só assim serão alcançados os resultados esperados e poderá haver maior efetividade de ação.

Assim como em todas as áreas, em relação à utilização da radiação solar para as distintas finalidades de aplicação, existem parâmetros intrínsecos a cada tipo de estudo e técnica de processo utilizada, tendo em vista a exposição para quantificação e avaliação futura. A seguir estão as principais limitações específicas para o método de desinfecção solar de efluentes:

⇒ A necessidade de longo tempo de exposição solar, com períodos variando de algumas horas a até mais de dois dias, dependendo das condições de insolação local e de nebulosidade.

⇒ A inadequação para o tratamento de grandes volumes de água utilizando os recipientes PET (politereftalato de etileno). No entanto, pesquisas mais recentes mostraram ser possível tratar um volume maior de água através de reatores construídos com concreto.

⇒ A baixa penetração da radiação solar devido ao alto teor de partículas existentes nos esgotos sanitários, o que acarreta

em um comprometimento da eficiência deste processo. No entanto, com o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento dos esgotos, tem-se obtido maiores remoções de sólidos suspensos, permitindo o uso da desinfecção solar.

⇒ O fato de não deixar residual compromete o uso da desinfecção para águas de abastecimento, pois não há como garantir a inativação dos microrganismos em casos de recontaminação. Portanto, um cuidado maior deve ser tomado quanto às condições de armazenamento e higiene domiciliar. Preferencialmente, o consumo dessas águas deve ser rápido, de forma a evitar possíveis recontaminações. Este ainda é um motivo pelo qual o cloro ainda impera no campo das opções de desinfecção, já que garante um residual na água.

⇒ Apesar das limitações enumeradas, a desinfecção solar apresenta as vantagens de: simplicidade operacional, baixo custo, requisito mínimo de área, pouca exigência de operação e manutenção, eficácia de inativação para grande variedade de microrganismos, e ausência do uso de produtos químicos e de geração de subprodutos tóxicos na água ou efluente final ^[16].

CAPÍTULO 07

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Ao retratar a temática do reúso de águas residuárias é imprescindível compreender que as águas provenientes dos esgotos domésticos podem ser classificadas em amarela, cinza, negra e marrom (Figura 12).^[88]

Figura 12 – Segregação do esgoto doméstico.

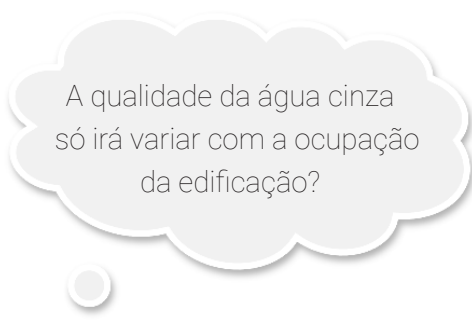


A caracterização destes diferentes tipos de águas residuárias é de fundamental importância para o sucesso dos projetos de reúso. Quanto mais informações se obtiver sobre o efluente, melhor se poderá caracterizá-lo e, assim, escolher o tratamento mais adequado, atendendo aos requisitos de qualidade exigidos para o reúso que se deseja.^[89]

No caso específico das águas cinzas, estas são provenientes de lavatórios, chuveiros, banheiras, pias de cozinha e máquinas de lavar roupa por exemplo, excluindo-se os vasos sanitários.

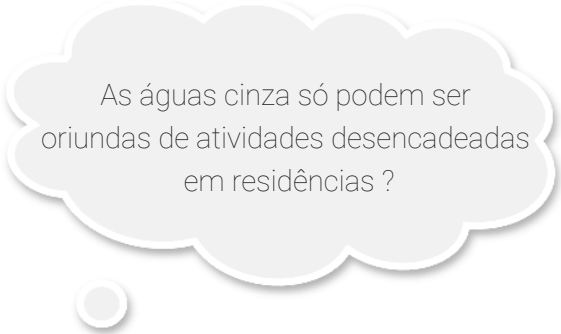
O grande potencial de reutilização das águas cinza pode ser atribuído ao seu baixo teor de poluentes, quando comparado às demais águas residuárias domésticas ^[90]. Além de que, o uso das águas residuárias em regiões do nordeste brasileiro tem sido apontada como uma das técnicas de convivência com a seca, já que nessas localidades existe escassez de água e o período chuvoso possui duração de aproximadamente três meses ^[91].

Além disso, as águas cinza representam 50 a 70% da água total consumida pelas famílias, contendo cerca de 30% da fração orgânica e de 9 a 20% de nutrientes. Isso as torna uma boa fonte para a reutilização, especialmente para a agricultura. ^[92]



A qualidade da água cinza só irá variar com a ocupação da edificação?

Não. A qualidade da água cinza dependerá das atividades domésticas realizadas. A sua composição será variável, influenciada por fatores tais como: o estilo de vida, costumes, instalações, uso e quantidade de produtos químicos domésticos ^[90].



As águas cinza só podem ser oriundas de atividades desencadeadas em residências ?

Como as ocupações das edificações são distintas (comercial, residencial e outras), conseqüentemente a qualidade destas águas irá variar e, uma vez que estas atividades são exequíveis em vários ambientes (dentre eles o comercial, industrial, público e outros) independentemente do tipo de ocupação, pode haver a geração da água cinza. Todavia a maior geração se dá prioritariamente em residências, em virtude de esse ser o local onde as águas cinzas possuem maior incidência e periodicidade.

As águas cinza se tornam uma fonte valiosa de água quando devidamente tratadas a fim de reduzir os contaminantes microbiológicos e químicos a níveis aceitáveis para o reúso pretendido ^[93].

Os usos das águas cinza após tratamento incluem: recarga de águas subterrâneas, descarga em vasos sanitários e irrigação de jardins, parques, campos de golfe e culturas ^[94].

Em países avançados tecnologicamente, as águas cinza tratadas são reutilizadas de acordo com regulamentos

ambientais atualizados em intervalos de tempo específicos, visando a proteção da saúde humana e do meio ambiente ^[95].

Os requisitos regulamentares para a reutilização não-potável de águas cinza variam entre países e regiões diferentes. Por exemplo, no Reino Unido, as águas cinza tratadas com elevada turbidez (< 10 UNT) podem ser reutilizadas para fins de utilização não-pontual de água, como a descarga de vasos sanitários. Porém, o limite de turbidez para o mesmo tipo de água é < 2 UNT na Califórnia ^[96].

Um resumo das diretrizes e padrões de reúso de águas residuárias, elaborados pela **United States Environmental Protection Agency** (USEPA), são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Diretrizes e padrões de reutilização de águas residuárias conforme USEPA ^[97]

Tipo de reúso	Qualidade da água de reúso					
	pH	DBO	Turbi- dez	SST	Coliformes fecais	Cloro
Uso urbano - todos os tipos de irrigação paisagística, descarga de vaso sanitário, proteção contra incêndio, condicionadores de ar	6-9	≤ 10 mg L ⁻¹	≤ 2 UNT	-	Não detectável /100ml	1 mg L ⁻¹ residual (mínimo)
Reúso agrícola - Culturas alimentícias processadas comercialmente, Irrigação superficial de pomares e vinhedos, silvicultura e irrigação de áreas com acesso restrito ao público.	6-9	≤ 30 mg L ⁻¹	-	≤ 30 mgL ⁻¹	≤ 200/100mL ⁻¹	1 mg L ⁻¹ residual (mínimo)
Reúso agrícola - Culturas não alimentícias, forrageiras, cereais, fibras e grãos e pastagens para rebanhos de leite.	6-9	≤ 30 mg L ⁻¹	-	≤ 50 mgL ⁻¹	≤ 200/100mL ⁻¹	1 mg L ⁻¹ residual (mínimo)

Reúso agrícola - culturas alimentares não processadas comercialmente, irrigação de superfície ou irrigação por aspersão	6-9	≤ 10 mg L ⁻¹	≤ 2 UNT	-	Não detectável /100ml	1 mg L ⁻¹ residual (mínimo)
Construção - compactação do solo, controle de poeira e confecção de concreto.	-	≤ 30 mg L ⁻¹	-	≤ 30 mgL ⁻¹	$\leq 200/$ 100mL ⁻¹	1 mg L ⁻¹ residual (mínimo)

CAPÍTULO 08

DIRETRIZES DA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE PARA REÚSO AGRÍCOLA DE EFLUENTES

Para que um efluente possa ser destinado ao uso agrícola dentro dos padrões estabelecidos pelas legislações pertinentes, é necessária uma desinfecção eficiente das águas residuárias.

As primeiras publicações da WHO (World Health Organization ou Organização Mundial de Saúde-OMS) acerca das recomendações para uso de efluentes de esgoto, águas cinza e excretas humanas foram inicialmente em 1973, e em 1989 e 2006, foram revistas e reeditadas. Estas recomendações têm constituído os fundamentos da maior parte das normas para reuso em todo o mundo.

As novas diretrizes para utilização de águas residuárias da WHO propõem a utilização de um número de obstáculos (barreira múltipla) ao longo da cadeia do uso de águas residuais não tratadas ou parcialmente tratados, em vez de concentrar-se somente na qualidade das águas residuais no ponto de utilização [2].

Por exemplo, o tratamento de águas residuárias, juntamente com a boa higiene alimentar, além de cozimento dos alimentos, pode ser suficiente para reduzir os riscos à saúde. A combinação de diferentes medidas de proteção da saúde acrescenta barreiras para prevenção à exposição aos riscos e, assim, reduz os riscos potenciais para a saúde.

Dentre tais “barreiras”, pode-se citar as dos subtópicos a seguir [98].

Tratamento de águas residuais

O tratamento é utilizado para evitar que os contaminantes entrem no ambiente. Opções de tratamento bastante interessantes são aquelas capazes de eliminar agentes patogênicos, mas que retenham nutrientes na água, o que vem a favorecer o reúso para irrigação. Uma combinação de técnicas de tratamento (e, por conseguinte, dos mecanismos preponderantes de remoção dos diferentes organismos) pode resultar em ampla e elevada eficiência, porém, por vezes, com elevado custo.

Restrição de culturas / produtos

Minimizam os riscos de saúde para os consumidores de produtos. Trata-se de restringir o cultivo (irrigação restrita, onde só é possível a irrigação de culturas submetidas ao cozimento antes do consumo, ao processamento industrial, cereais, etc.) e, portanto, há a possibilidade de uso de águas de pior qualidade. Inversamente, a irrigação irrestrita refere-se à irrigação de toda e qualquer cultura, inclusive de culturas alimentícias consumidas cruas, o que naturalmente exige águas de melhor qualidade.

Método de irrigação e períodos de retenção na fonte

Possibilitam a redução da contaminação dos produtos ou favorece para que haja tempo suficiente para a mortandade dos patógenos no ambiente antes da exposição.

A seleção do método de irrigação visa a proteção dos agricultores e consumidores simultaneamente, uma vez que os diferentes métodos (inundação, sulcos, aspersão, gotejamento e irrigação subsuperficial) podem potencializar ou minimizar o contato entre as águas residuárias, as plantas, os agricultores e mesmo o público circunvizinho [99].

Outra alternativa para reduzir os patógenos é cessar a irrigação. Nesses casos a irrigação é evitada durante os últimos 10 dias antes da colheita para permitir que os agentes patogênicos morram após a última aplicação das águas residuárias, reduzindo os riscos à saúde. Entretanto, alguns vegetais necessitam de água próximo ao período de colheita para ter maior valor de mercado. A solução adotada nesses casos seria que a irrigação próxima ao período de colheita fosse realizada, quando possível, com água tratada [98].

Métodos de controle da exposição

Evitam a contaminação do ambiente e o alcance aos grupos expostos. O Controle de exposição inclui uma variedade de medidas de proteção da saúde que reduzem os riscos à saúde dos trabalhadores e comunidades locais, tais como: o método de irrigação adotado, o uso de vestuário de proteção adequado (ou seja, botas ou sapatos para trabalhadores de campo e luvas para manipulação de cultura/produto) e a redução do acesso aos campos irrigados através cercas e sinalização.

Técnicas de preparo dos alimentos (lavagem / desinfecção e cozimento)

As medidas de preparo dos alimentos incluem a lavagem vigorosa da superfície rugosa de culturas de salada, a lavagem com uso de uma solução desinfetante e o cozimento completo de legumes. Juntamente com rigorosas técnicas de higiene pessoal e doméstica, essas medidas reduzem significativamente a exposição da cultura aos consumidores ^[98].

Vacinação e desparasitação em massa

A vacinação e desparasitação em massa podem prevenir a doença para aqueles que estão expostos ou tratar aqueles que estão doentes, assim, reduzindo futuras entradas de agentes patogênicos em águas residuais.

A Figura 13 exemplifica o enfoque multi-barreira para os três grupos de risco a partir da utilização de águas residuárias na agricultura.

Figura 13 – Exemplo do enfoque multi-barreira^[98].

E quais medidas de proteção são possíveis implantar para remover os patógenos ?

Na Tabela 4 é possível observar as diferentes medidas de proteção da saúde e a gama de remoção de patógenos nas águas residuárias.

Tabela 4 – Redução de patógenos com medidas de proteção da saúde para as águas residuárias ^[98]

Medida de Controle	Redução de patógenos (unidade log)	Observações
Tratamento das águas residuais	1-6	A redução dos organismos patogênicos através das estações de tratamento depende da combinação das medidas de segurança adicionais que serão utilizadas.
Irrigação por gotejamento (cultivos de caule baixo)	2	Cultivos de raiz (como alface) que crescem acima do solo mas parcialmente em contato com ele.
Irrigação por gotejamento (cultivos de caule alto)	4	Culturas como o tomate, em que a parte colhida não fica em contato com o solo.
Aspersão com rotação controlada	1	Uso de micro aspersores; aspersão com direção controlada, Anemômetros, etc.
Aspersão com zona de proteção	1	A zona de proteção deve ser de 50 a 100 metros quando a irrigação é por aspersão.
Decaimento de patógenos	0.5-2 por dia	Refere-se à mortalidade experimentada pelas bactérias da aplicação da última irrigação até o consumo. Isto depende das condições meteorológicas, radiação solar, além do tempo e tipo de cultura.
Lavagem das culturas com água	1	Lavagem com água limpa para preparação de saladas, legumes e frutas.

Desinfecção de culturas	2	Lavar com um desinfetante leve e enxaguar com água limpa legumes, frutas e produtos para preparação de saladas.
Retirar a casca das culturas	2	Frutas, raízes e tubérculos.
Cozimento	6-7	Imersão em ebulição ou próximo do ponto de ebulição da água até que o alimento seja cozido, garante a destruição do patógeno.

Referências

- [1] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa nacional de saneamento básico 2008. Rio de Janeiro, 2010. 219p.
- [2] WHO.WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Policy and regulatory aspects (Vol.1)**. Genebra: WHO, 2006a, 100 f.
- [3] BUKHARI, Z. et al. Using ultraviolet light for disinfection of finished water. **Water Science and Technology**, London, v. 50, n. 1, p.173 -178, 2004.
- [4] KALISVAART, B. F. Re-use of Wastewater: Preventing the recovery of pathogens by using medium-pressure UV lamp technology. **Water Science and Technology**, London, v. 50, n. 6, p.337-344. 2004.
- [5] LOBO, C. G. et al. Avaliação da desinfecção de água por reator utilizando radiação ultravioleta. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 1, p. p. 21-36, 2009.
- [6] MORGADO, W.F.F. **Desinfecção de águas naturais por radiação solar utilizando os bioindicadores: Escherichia Coli e Clostridium perfringens**. Goiânia: UFG.2008. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia do Meio Ambiente Goiânia.

[7] SOBSEY, M. D. **Managing water in the home: accelerated health gains from improved water supply.** WHO/SDE/WSH/02.07. Geneva: World Health Organization, 2002.

[8] HIRTLE, L.E. **Exploring Pretreatments for the Solar Water Disinfection (SODIS) Process.** 2008.168 f Masters Thesis. Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.

[9] ACRA, A.ET AL. **Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solution - Guidelines for households application in developing countries.** Department of Environmental Health. Beirut. American University of Beirut. 1984. Disponível em: <<http://almashriq.hiof.no/lebanon/600/610/614/solar-water/unesco/>> Acesso em 28.nov.2015.

[10] CHERNICHARO, C.A. Letal. (coordenador) **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: ABES-PROSAB, 2001, 118p.

[11] SÁNCHEZ-ROMAN, 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.

[12] SODIS. **Solar water disinfection: a guide for the application of SODIS.** Dübendorf: EAWAG/ SANDEC Regula Meierhofer, 2002, 88f. (SANDEC Report nº.06/02)

- [13] 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. 1,35-44p, 2014.
- [14] Braun, A. M. et al. **Radiométrie et actinométrie**. Presses Polytechniques Romandes, 542p, 1986.
- [15] BILOTTA, P. **Inativação de indicadores patogênicos em sistemas combinados de tratamento e pré-desinfecção de esgoto sanitário**. São Carlos: EESC-USP. 2006. 151f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [16] Usepa –U.S Environmental Protection Agency. **Wastewater technology fact heet: ultraviolet disinfection**. EPA-832-F-99-064, Washington, D.C., 9p.1999b.
- [17] USEPA– U. S. Environmental Protection Agency. **Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule**. EPA 815-R-06-007. United States, 2006
- [18] GONÇALVES, R.F et al. (coordenador). **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES-PROSAB, 2003, 438 p.
- [19] SODIS. Condições climáticas: Radiação Solar, **Nota Técnica #5**, 2003. Disponível em: <<http://www.sodis.ch>> Acesso em 8 de abril de 2014.

[20] WEGELIN, M. et al A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. **Aqua**, v. 43, n. 4, p. 154-169, 1994.

[21] TINÔCO, J. D. **Desinfecção por radiação ultravioleta:** estudo do desempenho do processo e avaliação econômica. São Carlos: EESC-USP. 2011. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos.

[22] RYER, A. D. **Light measurement handbook**. 2. edição. Newburyport: Technical Publications, 1997, 64p.

[23] MARTINS, R. **Desinfecção de águas residuais domésticas por radiação ultravioleta**. 2006. 50 f. In: Concurso de provas públicas para provimento de uma vaga de Prof. Coordenador do quadro do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, na área científica de Engenharia Química, no grupo de disciplinas de ciências de Engenharia. ISEP-IPP. 2006.

[24] BOLTON, J. R. Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: significance of refraction and reflection. **Water Research**, v. 34, n. 13, p. 3315-3324, 2000.

[25] SANTOS, J.G. et al. Desinfecção solar da água: a influência da temperatura da água para segurança no tratamento domiciliar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA. 7., 2009. Caruaru. **Anais...** Caruaru: ABCMAC. 2009.

[26] BOLTON, J.R.; COTTON, C.A. **The Ultraviolet Disinfection Handbook**. American Water Works Association, 2011. 149p.

[27] USEPA – U.S Environmental Protection Agency. **Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual**. EPA 815-R-99-014, Washington D.C., 346p 1999a.

[28] GEHRA, R. et al. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. **Water Research**, v.37, n.19, p.4573–4586, 2003.

[29] 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.

[30] Dejung, S. et al. Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions. **Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA**, v. 56, n. 4, p. 245-256, 2007.

[31] MONCAYO-LASSO, A. et al. Simultaneous E. coli Inactivation and NOM 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.

[32] Schuch AP et al. Development of a DNA-dosimeter system for monitoring the effects of solar-ultraviolet radiation. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 8, n. 1, p. 111-120, 2009.

[33] Spuhler, D. et al. The effect of Fe_2^+ , Fe^{3+} , H_2O_2 and the photo-feton reagent at near natural pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing Escherichia Coli. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 96, n.1, p.126-141, 2010.

[34] ARBAGE, M. A. et al. Avaliação econômica de tecnologias sociais aplicadas à promoção de saúde: abastecimento de água por sistema SODIS em comunidades ribeirinhas da Amazônia. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 7, n. 18, p. 2119-2127, 2013.

[35] Monteiro, P. C. G. **Viabilidade do uso da radiação solar na desinfecção da água**. Brasília: UNB. 2005.19 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília (DF).

[36] GILBOA, Y., FRIEDLER, E. UV disinfection of RBC-treated light greywater effluent: Kinetics, survival and regrowth of selected microorganisms. **Water research**, v. 42, n. 4, p. 1043-1050, 2008.

[37] FENNER, R; KOMVUSCHARA, K. A new kinetic model for ultraviolet disinfection of greywater. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 6, p. 850-864, 2005.

[38] ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3ª. edição, Rio de Janeiro. Interciência, 2011.

[39] Marugán, J. et al.. Analogies and differences between photocatalytic oxidation of chemicals and photocatalytic inactivation of microorganisms. **Water research**, v. 44, n. 3, p. 789-796, 2010.

[40] KOLLU, K. **Investigation of Factors that Limit Efficacy of Ultraviolet Disinfection in Water and Wastewater Treatment**. 2014.219 f. Doctoral dissertation (Doctor of Philosophy in Environmental Engineering). Carleton University Ottawa, 2014.

[41] DANIEL, L. A. et al. (coordenador). Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária- ABES. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 2001.155 p.

[42] CASLAKE, L. F. et al. Disinfection of contaminated water by using solar irradiation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 2, p. 1145-1151, 2004

[43] SODIS. **Qualidade da água**: turbidez e profundidade da água, Nota Técnica #7, 2003d. Disponível em: <<http://www.sodis.ch>> Acesso em 8 de abril de 2014

[44] BRANDÃO, C.C.S. et al. Avaliação da Desinfecção Solar na Região Centro-Oeste do Brasil Usando Diferentes Organismos Indicadores de Contaminação. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 27., 2000. Porto Alegre. **Anais eletrônicos**....Porto Alegre: AIDIS, 2000.

[45] 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.

[46] Templeton, M. R. et al. Inactivation of particle-associated viral surrogates by ultraviolet light. **Water research**, v. 39, n. 15, p. 3487-3500, 2005.

[47] WILSON, S.A. **Impact of Water Quality on Solar Disinfection (SODIS): Investigating a Natural Coagulant Pretreatment on the Photoinactivation of Escherichia Coli**. 2010.168f. Doctoral dissertation. Department of Civil Engineering, University of Toronto.2010.

[48] ALVES, T.R. **Eficiência de um sistema de desinfecção solar de águas residuárias domésticas com adição de diferentes doses de peróxido de hidrogênio**. Botucatu:UNESP. 2015. 63 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu.

[49] BOTTO, M.P. **Avaliação do processo de desinfecção solar (SODIS) e de sua viabilidade social no Estado do Ceará**. Fortaleza: UFC. 2006.196 f. Mestrado (Dissertação em Engenharia hidráulica e ambiental) - Universidade Federal do Ceará, 2006.

[50] SODIS. Qualidade da água:Concentração de Oxigênio, **Nota Técnica #8**, 2003e. Disponível em: <<http://www.sodis.ch>>. Acesso em: 8 de abril de 2014

[51] REED, R. H. et al. Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations. **Letters in Applied Microbiology**, v. 30, n. 6, p. 432-436, 2000.

[52] Botto, M. P. et al. Efeito da oxigenação por agitação manual da água na eficiência de inativação de coliformes termotolerantes utilizando luz solar para desinfecção em batelada. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 347-352, 2009.

[53] FÉLIX, L.F. **Desinfecção solar de água para comunidades de baixa renda**. 2010.94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2010. UFRN.

[54] MADIGAN, T.M. et al. **Microbiologia de Brock**. 10^a ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004

[55] Wegelin, M. et al. A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. **Aqua**, v. 43, n. 4, p. 154-169, 1994.

[56] DA Silva, E.m.a.m. **Uso da solarização na redução de microrganismos patogênicos no efluente doméstico**. 2007. 47f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de Taubaté, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, 2007.

[57] MÁRQUEZ-BRAVO, L.G. Desinfección solar. **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. México**, 1998

[58] INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 10.05.2016.

[59] Amaral, L. A. et al. Uso da radiação solar na desinfecção da água de poços rasos. **Arquivo do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 73, n. 1, p. 45-50, 2006.

[60] HERRERA, A. G., **Desinfección Solar Del Agua**. IMTA – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Mexico, 2003.

[61] PATERNIANI, J.E.S., DA SILVA, M.J.N. Desinfecção de efluentes com tratamento terciário utilizando energia solar (SODIS): avaliação do uso do dispositivo para concentração dos raios solares. **Engenharia. Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro. v. 10. n. 1,p. 09-13,Mar.2005.

[62] 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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] Nalwanga, R. et al. Evaluation of solar disinfection of *E. coli* under Sub-Saharan field conditions using a 25L borosilicate glass batch reactor fitted with a compound parabolic collector. **Solar Energy**, v. 100, p. 195-202, 2014.

[66] DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v. 2. São Carlos: Rima, 2005.

[67] BERNEY, M. et al. Thomas. Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia Coli* during solar disinfection (SODIS). **Microbiology**, v. 152, n. 6, p. 1719-1729, 2006a.

[68] Bosshard, F. et al. Solar disinfection (SODIS) and subsequent dark storage of *Salmonella typhimurium* and *Shigella flexneri* monitored by flow cytometry. **Microbiology**, v. 155, n. 4, p. 1310-1317, 2009.

[69] WRIGHT, H. B.; CAIRNS, W. L. Desinfección de agua por medio de Luz Ultravioleta. [on line]. In: **Simposio Regional sobre calidad del agua**. Desinfección efectiva. Lima: CEPIS, 1998. Disponível em: < <http://www.contraplagas.com/images/archivos/conductos.pdf>> . Acesso em: 31, jan, 2015.

[70] CABANELLAS, C. F. G. **Avaliação do sistema de tratamento de esgoto doméstico pelo processo de escoamento superficial, pós UASB, da remoção de N e P e da desinfecção via SODIS**. Viçosa:UFV. 2013. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade de Viçosa, MG.

[71] 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.

[72] BOYLE, M. et al. Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 74, n. 10, p. 2997-3001, 2008.

[73] 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, p. 138-143, 2011.

[74] HIJNEN, W. A. M. et al. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: a review. **Water research**, v. 40, n. 1, p. 3-22, 2006.

[75] OKUNO, E.; VILELA, M. A. C. Radiação ultravioleta: características e efeitos. Temas Atuais de Física. 1ª ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

[76] Environmental Protection Agency – EPA. **United States Environmental Protection Agency**. 2010. Disponível em: <<https://www.epa.gov>>. Acesso em: 06.01.2017.

[77] RIBEIRO, K. **Estudo experimental e modelagem matemática de reator solar híbrido para degradação de fenol em solução aquosa pelo processo foto-Fenton**. São

Paulo: Poli-USP. 2009.185p. Doutorado (Engenharia Química). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[78] SODIS. Efeitos da estação e do clima, **Nota Técnica #6**, 2003c. Disponível em: <<http://www.sodis.ch>> Acesso em 8 de abril de 2014

[79] ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. Botucatu: FCA-UNESP. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho.

[80] VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotoelétricos**. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, 2008.

[81] SOMMER, B. et al. SODIS- an emerging water treatment process. **Aqua (oxford)**, v. 46, n. 3, p. 127-137, 1997.

[82] OATES, P.M. et al. Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti. **Water Research**, v. 37, n. 1, p. 47-54, 2003.

[83] HINDIYEH, M. et al. Investigating the efficiency of solar energy system for drinking water disinfection. **Desalination**, v. 259, n.1, p 208–215, 2010

[84] RIBEIRO, K. **Estudo experimental e modelagem matemática de reator solar híbrido para degradação de fenol em solução aquosa pelo processo foto-Fenton.** São Paulo: Poli-USP. 2009.185p. Doutorado (Engenharia Química). Universidade de São Paulo. Escola Politecnica da Universidade de São Paulo.

[85] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L. 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos - Brasil, 2ª edição.

[86] GÓMEZ-COUSO, H. et al..Efficacy of the solar water disinfection method in turbid waters experimentally contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under real field conditions. **Tropical Medicine & International Health**, v. 14, n. 6, p. 620-627, 2009b.

[87] ENCINAS, J; IRIARTE, M. Evaluación de la eficiencia del método SODIS en la inactivación de coliformes termo-tolerantes en tres regiones de Bolivia (valle, trópico y altiplano). **Facultad de Ciencias y Tecnología. Serie de Publicaciones Técnicas**, v. 1, n. 5, p. 21-24, 2003.

[88] OTTERPOHL, R. Black, brown, yellow, grey- the new colors of sanitation. *Water* 21. p. 37-41, out. 2001.

[89] BAZZARELLA, B. B. Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações. Vitória:UFES, 2005. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

[90] MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. São Paulo: Poli-USP. 2008. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, São Paulo-SP. 2008.

[91] SOUSA, J. T. de. et al. Tratamento de águas residuárias: uma proposta para a sustentabilidade ambiental. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Cruz das Almas, n. 1, p.90-97, 2006.

[92] FOUNTOULAKIS, M. S. et al. Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. **Science of the Total Environment**, v. 551, p. 706-711, 2016

[93] BODDU, V.M. et al. Gray water recycle: Effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, p. 4435-4443, 2016.

[94] OTTOSSON, J. **Hygiene aspects of greywater and greywater reuse**. Licentiate thesis, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.

[95] BOYJOO, Y. et al. A review of greywater characteristics and treatment processes. **Water Science and Technology**, v. 67, n. 7, p. 1403-1424, 2013.

[96] ZITA, L. T. et al. **Feasibility of a semi-batch vertical-flow wetland for onsite residential greywater treatment.** Ecological Engineering, v. 82, p. 311-322, 2015.

[97] USEPA – U. S. Environmental Protection Agency. **Guidelines for water reuse.** EPA/625/R-04/108, Washington DC., 2004.

[98] WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Wastewater use in agriculture.** V. 2. Geneva: WHO, 2006b, 196 f.

[99] BASTOS, R. K. X et al. **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura.** Rio de Janeiro: ABES-PROSAB, 267p, 2003.



Tipografias utilizadas:
Bookman Old Style
Roboto

Papel da capa:
Cartão Supremo 300g

Papel do miolo:
Polen Soft 80g

Impresso na Copiart em 2019.

-

Todos os direitos são reservados à Editora IFRN,
não podendo ser comercializado em período de
contrato de cessão de direitos autorais.

Em caso de reimpressão com recursos próprios
do autor, está liberada a sua comercialização.

Em mais de 12 anos de história, a Editora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) já publicou livros em todas as áreas do conhecimento, ultrapassando a marca de 150 títulos. Atualmente, a edição de suas obras está direcionada a cinco linhas editoriais, quais sejam: acadêmica, técnico-científica, de apoio didático-pedagógico, artístico-literária ou cultural potiguar.

Ao articular-se à função social do IFRN, a Editora destaca seu compromisso com a formação humana integral, o exercício da cidadania, a produção e a socialização do conhecimento.

Nesse sentido, a EDITORA IFRN visa promover a publicação da produção de servidores e estudantes deste Instituto, bem como da comunidade externa, nas várias áreas do saber, abrangendo edição, difusão e distribuição dos seus produtos editoriais, buscando, sempre, consolidar a sua política editorial, que prioriza a qualidade.



editoraifrn



**Cristiane
Do Nascimento Fernandes**

Mestra em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2018). Detentora também dos títulos de Engenheira Civil (2014) e Bacharela em Ciência e Tecnologia (2012) pela Universidade Federal Rural do Semiárido.



**Fernanda
Lima Cavalcante**

Tecnóloga em Meio Ambiente pelo Centro Federal Tecnológico do Rio Grande do Norte (2005), Bióloga pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), Mestre em engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2007) e Doutora em Manejo do Solo e Água, pela Universidade Federal Rural do Semiárido (2017).



**Rafael
Oliveira Batista**

Possui Pós-Doutorado (2010), Doutorado (2008), Mestrado (2004) e Graduação (2002) em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é Professor Associado I da Universidade Federal Rural do Semiárido, membro do Conselho do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental desta e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (Conceito 4).

Atualmente, muita atenção é dada às alternativas de tratamento de efluentes sanitários e, nessa questão, a desinfecção solar deve, necessariamente, ser considerada. Neste livro, discutem-se as características quali-quantitativas, os organismos indicadores, radiação ultravioleta natural e os fatores que influenciam a desinfecção solar. Trata-se de assunto abordado com o necessário rigor técnico-científico, para que possa ser utilizado por profissionais da área de engenharia agrícola e ambiental, sanitária e ambiental, civil e gestão ambiental.

ISBN 978-85-94137-81-4



9 788594 137814 >

