

Ultrafiltração por gravidade como alternativa para tratamento de água no ponto de uso: uma revisão

Com a crescente poluição dos reservatórios de água destinados ao abastecimento humano uma grande parcela da população mundial que não dispõe de água tratada estão sujeitos a ingestão de água contaminadas por microrganismos, pesticidas, cianotoxinas, fármacos, desreguladores endócrinos, entre outros contaminantes, culminando em graves problemas na saúde humana. Como a maioria da população que não ingere água tratada concentra-se em regiões distantes ou pouco povoadas o abastecimento por parte das companhias de água torna-se inacessíveis, assim as tecnologias de tratamento de água no ponto de uso (POU) mostram-se atraentes e viáveis. Dentre as POU existentes, a ultrafiltração por gravidade vem chamando atenção, pela sua eficiência na remoção de diversos contaminantes, necessitando de baixa pressão para funcionamento, pouca manutenção e permitindo a formação do biofilme, atuando na estabilização do fluxo e melhorias na qualidade do permeado. Sendo assim, o presente trabalho busca apresentar a tecnologia de ultrafiltração por gravidade como alternativa para tratamento de água no ponto de uso. A coleta de dados para a presente pesquisa foi realizada a partir do levantamento de estudos em publicações na literatura acadêmica, relacionadas ao tema 'Uso de membrana de ultrafiltração por gravidade para tratamento de água no ponto de uso', compreendendo artigos publicados no período de 2009- 2021. Como base de dados para a pesquisa utilizou-se a Web of Science (WOS), Google acadêmico, Scopus e PubMed. Foram contemplados 127 artigos, no qual 15 foram selecionados, devido sua relevância para pesquisa. Através dessa pesquisa foi possível verificar que o processo de Ultrafiltração por Gravidade apresenta excelentes resultados na remoção de microrganismos e microcontaminantes orgânicos presentes em águas destinadas ao consumo humano. O biofilme formado na membrana também se apresenta com grande importância, uma vez que melhora consideravelmente a qualidade do permeado através de sua composição biológica. A tecnologia de ultrafiltração por gravidade mostrou-se como uma boa alternativa para tratamento descentralizado da água apresentando-se como alternativa simples, moderna e acessível, destinada principalmente para populações que não ingerem água tratada.

Palavras-chave: Ultrafiltração por gravidade; POU; Microcontaminantes orgânicos.

Gravity ultrafiltration as an alternative for point-of-use water treatment: a review

With the large amount of water contained in the world's supply to the supply of a large amount of human beings, the ingestion of a large amount of substances, the addition of endocrine substances, among other ingredients, the ingestion in graves problems in human health. As the majority of the population that does not have treated water is concentrated in distant or sparsely populated regions, the supply by water companies becomes inaccessible, as well as technologies for water treatment at the point of use (POU) show up. Attractive and viable. Among POU as POU, gravity comes from a series of care, pressure removal, maintenance and maintenance of the biofilm, flow stabilization and improvements in permeate quality. Therefore, the present work seeks to present a gravity ultrafiltration technology as an alternative for water treatment at the point of use. Data collection for the present survey of studies was carried out from the survey of studies in academic research, related to the theme 'Use of gravity filtration membrane for water treatment at the point of use', including articles published in the period 2009 - 2021. As a database for use (WOS), Google of Science, Scopus and PubMed. A total of 127 articles were contemplated, of which 15 were selected, due to their research for research. It was possible to verify the process of this ultrafiltration research presents excellent results in the removal of microorganisms and organic microcontaminants present in filtered water for human consumption. The biofilm formed on the membrane is also of great importance, since it considerably improves the quality of the permeate through its biological composition. Gravity ultrafiltration technology proved to be a good alternative for the decentralized treatment of water, presenting itself as a simple, modern and accessible alternative, mainly directed to waters that do not ingest treated.

Keywords: Gravity ultrafiltration; POU; Organic microcontaminants.

Topic: Engenharia Sanitária

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Received: 07/05/2022

Approved: 28/05/2022

Amanda da Silva Barbosa Cartaxo 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9017442680465381>
<http://orcid.org/0000-0002-2514-6941>
amandauebpio@gmail.com

Valderi Duarte Leite 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2319382787465258>
<http://orcid.org/0000-0001-5861-7407>
mangabeiraleite@gmail.com

Maria Virgínia da Conceição Albuquerque 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9675009734261818>
<http://orcid.org/0000-0001-5060-584X>
virginia.albuquerque@yahoo.com.br

Roberta Milena Moura Rodrigues 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6661871220648146>
<http://orcid.org/0000-0002-1619-5637>
robertamilenamoura9@gmail.com

Jefferson Santos de Amorim 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2448794112329073>
<http://orcid.org/0000-0002-5630-7373>
bio_jefferson20@hotmail.com

Ingrid Lelis Ricarte Cavalcanti 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4598063179226686>
<http://orcid.org/0000-0002-4241-6480>
ingrid_lelis@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.005.0009

Referencing this:

CARTAXO, A. S. B.; LEITE, V. D.; ALBUQUERQUE, M. V. C.; RODRIGUES, R. M. M.; AMORIM, J. S.; CAVALCANTI, I. L. R.. Ultrafiltração por gravidade como alternativa para tratamento de água no ponto de uso: uma revisão. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.5, p.110-122, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.005.0009>

INTRODUÇÃO

A poluição dos recursos hídricos é um desafio global que afeta países do mundo inteiro, prejudicando o crescimento econômico, saúde ambiental e impactando negativamente a vida de bilhões de pessoas. Dentre as principais fontes de poluição, destaca-se: esgoto doméstico e industrial, crescimento populacional, agrotóxicos e fertilizantes agrícolas, culminando em problemas de eutrofização, poluição microbiana, poluição química entre outros agravos. Com a qualidade afetada, a água ingerida sem tratamento adequado pode ser veículo de transmissão de diversas doenças ocasionadas por microrganismos patogênicos e seus metabólitos (CABRAL, 2010). São bactérias, protozoários, fungos e vírus que depois de ingeridos apresentam potencial de letalidade, principalmente entre crianças, idosos e imunodeprimidos (BOUSEETTINE et al., 2019).

As doenças gastrointestinais e diarreicas são as mais prevalentes pela ingestão de água contaminada por microrganismos patogênicos (ACHESON et al., 2009). A Organização Mundial da Saúde (2018) afirma que as doenças diarreicas continuam a ser uma das principais causas de doença e morte nos países em desenvolvimento. Todos os anos, cerca de 2,2 milhões de pessoas morrem de diarreia, sendo 90% dessas mortes ocorrem entre crianças de 0 a 5 anos de idade. Essas doenças são prontamente controladas melhorando os serviços de saneamento básico, principalmente no que tange o abastecimento de água potável, em especial nos países em desenvolvimento, que são os mais afetados pela ausência desses serviços e apresentam os maiores índices de mortalidade por doenças de veiculação hídrica (PAIVA et al., 2018; GOMES et al., 2020).

No Brasil, apesar de apresentar considerável disponibilidade de recursos hídricos, estima-se que mais de 35 milhões de brasileiros não possuem acesso a água tratada, essa situação é ainda mais alarmante na região Norte e Nordeste, que há anos apresentam os piores índices de saneamento básico do país, especialmente nas comunidades rurais. São muitos os desafios para levar água potável a todos, em muitas localidades pouco povoadas ou distantes, os custos, a distância e escassez de recursos nesses locais torna-se economicamente inviável para as companhias o fornecimento de água tratada.

Uma alternativa viável seria o tratamento descentralizado através das Tecnologias de Tratamento de Água no Ponto de Uso (POU). As tecnologias POU são sistemas de tratamento de água no local através de tratamento físico, químico ou biológico para remover contaminantes (CHAIDEZ et al., 2016). Numerosas tecnologias surgiram e foram implementadas em sistemas de tratamento POU nas últimas décadas (filtração doméstica, SODIS, filtro biológico, entre outras), melhorando significativamente a qualidade da água destinada ao consumo humano.

Devido seu maior potencial de remoção de contaminantes orgânicos e microrganismos, potencial de aceitação e baixo impacto ambiental, as membranas de Ultrafiltração são as que melhor se adéqua para o tratamento de água no ponto de uso doméstico, em situações de emergência, como catástrofes ambientais e secas em que a água pode se tornar escassa ou de má qualidade (LOO et al., 2012). Há algumas décadas atrás as membranas de ultrafiltração apresentavam custo financeiro elevado, para obter alta vazão precisa

de bombas para manter elevada pressão no sistema, o que requer alto gasto de energia e, a periodicidade de retrolavagem para evitar formação de biofilme eram pontos que evitavam sua utilização como tecnologia POU.

Porém estudos demonstram que a membrana de ultrafiltração pode ser utilizada por gravidade. Diferentemente da ultrafiltração convencional, a membrana de UF por gravidade pode ser operada em baixa pressão transmembranar (0,04- 0,1 bar) e em modo de filtração contínuo, apresentando fluxo estável (média de 5 L.h⁻¹.m⁻²) (VARBANETS et al., 2011; DARLON et al., 2017). Além disso, pode ser operado por muito tempo (anos) sem retrolavagem ou limpeza da membrana, necessitando de baixa manutenção, pois permite a formação de biofilme em sua superfície, o que contribui para estabilização do fluxo e qualidade do permeado. O Sistema de UF por gravidade, apresenta alto desempenho na remoção de microrganismos como vírus, bactérias e protozoários, e compostos orgânicos, evidenciando-se como uma tecnologia que pode ser utilizada como tratamento descentralizado de água destinada ao consumo humano (PRONK et al., 2019).

Com uma grande parcela de brasileiros sem acesso a água potável e os reservatórios destinados ao abastecimento cada vez mais contaminados com microrganismos, pesticidas, cianotoxinas, fármacos e desreguladores endócrinos, culminando em graves problemas de saúde na população que faz uso da água sem tratamento, como forma de minimizar essa situação o governo brasileiro sancionou recentemente o Novo Marco do Saneamento, dentre as metas estabelecidas destaca-se a garantia do atendimento de 99% da população com água potável até o final do ano de 2033 (BRASIL, 2020). Para atender essa demanda, será necessário o investimento em Tecnologia POU, sendo a Ultrafiltração por gravidade atraente para locais que não recebem água tratada ou é tratada de forma ineficiente, devido sua eficácia na remoção de diversos contaminantes, baixo custo, facilidade de implementação e baixo impacto ambiental.

Dessa forma, visando ampliar e contribuir com os estudos que estão sendo realizados com as tecnologias de tratamento de água no ponto de uso, a presente revisão busca apresentar a tecnologia de ultrafiltração por gravidade como alternativa para tratamento de água no ponto de uso, uma vez conhecida sua eficiência pode-se tornar um sistema de grande utilidade para fornecer água potável, principalmente para populações que fazem uso de água sem tratamento.

METODOLOGIA

A coleta de dados para a presente pesquisa foi realizada a partir do levantamento de estudos em publicações na literatura acadêmica, relacionadas ao tema 'Uso de membrana de ultrafiltração por gravidade para tratamento de água no ponto de uso'. Foi realizado levantamento bibliográfico e constatado que a primeira publicação que trata da temática foi publicada no ano de 2009, sendo assim utilizou-se o período de 2009-2021 como intervalo temporal da pesquisa de dados. Como sustentação para o trabalho, foi adotada a metodologia de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que busca a compilação de produtos acadêmicos, elaborados por uma variedade de pesquisadores, em situações e locais diversos, possibilitando a compreensão das evidências científicas presentes na área (MUÑOZ et al., 2002). Neste contexto, foram definidas cinco palavras-chave em português e as respectivas palavras na língua inglesa para dar início à

busca, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Resumo das palavras-chave escolhidas.

Número	Palavras-chave	Keywords
	Português	Inglês
1.	'ultrafiltração por gravidade'	'gravity ultrafiltration'
2.	'tratamento de água por ultrafiltração por gravidade'	'water treatment by gravity ultrafiltration'
3.	'tratamento de água no ponto de uso por ultrafiltração por gravidade'	'water treatment at the point of use by gravity ultrafiltration'
4.	'tratamento de água para consumo humano por UF-GDM'	'treatment of water for human consumption by UF-GDM'
5.	'novas tecnologias para tratamento de água no ponto de uso'	'new technologies for water treatment at the point of use'

Como base de dados para a pesquisa utilizou-se a Web of Science (WOS), Google acadêmico, Scopus e PubMed. O resultado desta primeira busca na base de dados resultou em um total de 127 artigos. Após a pesquisa, foi iniciado o tratamento dos dados. A partir da ferramenta Clarivate Analytics, disponível na própria Web of Science, foram organizados e sistematizados alguns gráficos e informações como: áreas de pesquisa, autores, idiomas, países, revistas e anos de publicação dos documentos encontrados. Após a aplicação dos filtros, foram selecionados 15 artigos de maior relevância que contribuiriam significativamente para discussão da pesquisa.

DISCUSSÃO TEÓRICA

Tecnologias do tratamento de água no ponto de uso

Tecnologia de tratamento de água no ponto de uso (POU) são sistemas de tratamento de água no local que reduzem ou eliminam os patógenos, cor, turbidez e outros contaminantes presentes em águas destinadas ao consumo humano (EPA, 2006). As tecnologias POU tratam a água potável na casa antes de ser consumida, diminuindo o risco de contaminação tanto na fonte quanto durante o transporte para a família (SOBSEY et al., 2008). Sustentável, socialmente aceitável e de baixo custo intervenções como essas, têm o potencial de melhorar a qualidade físico-química e microbiológica da água destinada ao consumo humano em ambiente doméstico (POOI et al., 2018).

O mercado de sistemas de tratamento de água em pontos de uso vem em ascensão nos últimos anos, estima-se que ocorrerá um crescimento de US \$ 21,9 bilhões até 2023. As tecnologias POU estão crescendo devido à alta demanda por água potável, mudanças nas legislações de qualidade da água, ocasionadas pelos inúmeros benefícios do tratamento a saúde humana, bem como inovações tecnológicas na indústria de tratamento de água. Fatores importantes como a rápida urbanização, a crescente conscientização sobre as tecnologias de purificação de água, o crescimento da população de classe média e o aumento da renda disponível também devem impulsionar a demanda por sistemas POU.

Désille (2012) destaca que a escolha de uma tecnologia no ponto de uso depende de um grande número de fatores. Uma análise cuidadosa, antes de qualquer decisão sobre orientação técnica, é, portanto, essencial. Abaixo são elencados alguns critérios importantes que devem ser levados em consideração na implementação das tecnologias no ponto de uso.

Eficiência: Antes de qualquer tratamento empregado, deve-se primeiro conhecer as características precisas da água a ser tratada, saber os tipos de contaminantes que devem ser removidos é essencial para saber a tecnologia a ser melhor aplicada. O maior objetivo de um dispositivo de tratamento de água doméstico é tornar a água potável e própria para consumo humano, sendo assim a tecnologia a ser empregada deverá ser eficiente na remoção de uma gama de contaminantes presentes na matriz aquática disponível para uso por uma determinada população. Ao mesmo tempo, deverá garantir o abastecimento dos volumes de água potável necessários para os habitantes da mesma residência. Dependendo do país, uma família contém de 2 a 15 pessoas. Segundo a ONU cada pessoa precisa de no mínimo 20 litros de água potável por dia (para beber e cozinhar). É, portanto, necessário garantir que os sistemas de tratamento previstos sejam capazes, todos os dias, de tratar os volumes de água necessários ao consumo doméstico.

Apropriação pelos usuários: As tecnologias POU deverão integrar-se de forma rápida e fácil às práticas diárias de uma residência. A noção de apropriação pelos usuários é fundamental, se não for garantida, o risco de abandono (ou não uso) do sistema de tratamento é alto. Outro ponto que deverá ser levado em consideração são os hábitos e as práticas dos usuários. Cada localidade, cada família, de acordo com os hábitos culturais ou condicionantes ligados ao lugar de vida, desenvolveu lógicas e estratégias. Trata-se, portanto, de garantir que o princípio do tratamento e do armazenamento não entre em conflito com os hábitos das famílias na gestão diária da água.

Viabilidade técnica: A complexidade dos protocolos de manutenção que os usuários devem seguir para uso de uma tecnologia POU pode variar muito, dependendo das soluções técnicas consideradas. Por exemplo, aplicar a dosagem correta de cloro (desinfecção), respeitar a exposição ao sol (Sodis), são dois protocolos que podem parecer simples, mas podem ser questões complexas para alguns usuários.

Durabilidade: Outro ponto que deverá ser considerado é a durabilidade do sistema, visto que o tratamento doméstico de água requer, a longo ou curto prazo, e de forma mais ou menos regular, a compra de materiais e atividades de manutenção. A utilização destes diferentes bens e serviços requer o fácil acesso no mercado. Cada opção técnica tem seus requisitos em termos de peças de reposição e serviços. Portanto, é essencial avaliar a viabilidade do setor de serviços correspondente e o contexto econômico local.

Viabilidade financeira: Um dispositivo é financeiramente viável se, por um lado, o custo do investimento inicial for acessível aos usuários pretendidos e, por outro lado, se estes tiverem capacidade financeira para arcar com os custos operacionais associados a esse investimento. O custo de aquisição de um sistema depende do preço de compra, bem como de quaisquer políticas de subsídio implementadas. Quando ocorre investimentos governamentais na implantação e manutenção da tecnologia em questão, torna-se mais acessível a população beneficiada, em especial em países em desenvolvimento e zonas rurais, que apresentam alta taxa de doenças de veiculação hídrica.

Com o aumento de compostos tóxicos presentes nas matrizes aquáticas, com potencial de bioacumulação e posteriores danos à saúde humana caso ocorra à ingestão de água sem tratamento adequado, pesquisadores do mundo inteiro vêm desenvolvendo tecnologias POU mais sofisticadas, com capacidade de remoção de diversos contaminantes. Segundo o relatório sobre tendências do mercado por

tecnologia no ponto de uso publicado pela Grand view research (2020), as tecnologias com maior potencial de crescimento até 2027 são: Métodos de filtração por membrana, sistemas de destilação e métodos de desinfecção. Dentre essas, espera-se que o segmento de tecnologia de filtração por membranas responda por uma participação de mercado significativa, devido à alta capacidade de tratamento da água, diferentes tipos de membranas e fácil implantação de filtros em residências, instituições e locais de trabalho.

Características do processo de Ultrafiltração por Gravidade

A ultrafiltração por membrana acionada por gravidade (UF-GDM) é uma modalidade específica do processo de ultrafiltração. Em comparação com a convencional, a UF-GDM é operada em baixa pressão transmembranar (0,04- 0,1 bar) e em modo de filtração contínuo, apresentando fluxo estável (média de 5 L.h⁻¹.m⁻²) (VARBANETS et al., 2011). Além disso ao contrário dos sistemas de membrana de ultrafiltração típicos, é operado por muito tempo (em média de 2 anos) sem retrolavagem ou limpeza da membrana, necessitando de baixa manutenção. Permite a formação de biofilme na superfície da membrana, o que contribui para estabilização do fluxo e qualidade do permeado. O Sistema UF-GDM mostra-se eficiente na remoção de microrganismos como vírus, bactérias e protozoários, evidenciando-se como uma tecnologia que pode ser utilizada como tratamento descentralizado de água destinada ao consumo humano (PRONK et al., 2019).

Com o objetivo de analisar o sistema UF-GDM sem utilizar retrolavagem, limpeza química ou fornecimento externo de energia Varbanets et al. (2011) utilizaram membrana UF do tipo planar e, monitoraram um sistema UF-GDM por 24 meses. O sistema foi operado em pressões relativamente baixas (40-65 cm de coluna d'água). Foram utilizados diferentes tipos de água de alimentação, incluindo água de rio (Chriesbach, Suíça), água do lago (Greifensee, Suíça) e águas residuais diluídas a 10% e 30% (Efluente primário, Duebendorf, Suíça). O fluxo estabilizou-se por volta do 7º dia e permaneceu estável durante pelo menos 120 dias para todos os tipos de água de alimentação (os primeiros 30 dias são mostrados na Figura 1). O sistema UF-GDM não foi afetado por aumento da turbidez da água até 100 NTU. O fluxo do permeado estabilizou-se entre 4-10 h⁻¹.m⁻². Esta nova abordagem para operar sistemas UF em condições de fluxo estáveis pode ser considerada um importante avanço na tecnologia de membrana, pois permite o desenvolvimento de uma tecnologia POU com grande potencial de implantação.

Tang et al. (2016) também observaram o fenômeno de estabilização do fluxo. Utilizando um sistema de ultrafiltração de membrana acionada por gravidade em escala piloto sob baixa pressão gravitacional (65, 120 e 200 mbar) sem realizar qualquer pré-tratamento na água de alimentação, retrolavagem, descarga ou limpeza química. Os resultados revelaram que o sistema UF-GDM apresentou desempenho eficiente na remoção de turbidez e compostos orgânicos. A estabilização do fluxo ocorreu após 10 dias de operação. Os valores médios do fluxo estável foram 6,6, 8,1 e 8,6 h⁻¹.m⁻² para pressões de 65, 120 e 200 mbar, respectivamente. O fluxo permaneceu estável por 58 dias, após esse período foi realizado limpeza física simples e o sistema recuperou seu fluxo estável. Os resultados evidenciam que é possível utilizar o processo UF-GDM com baixa manutenção.

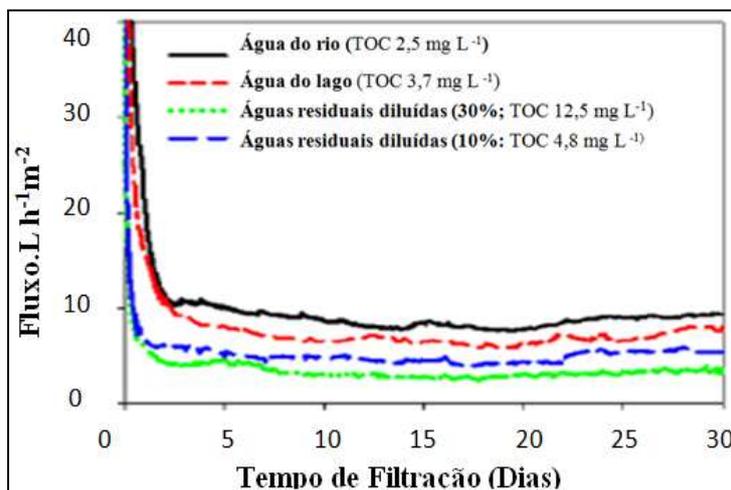


Figura 1: Estabilização do fluxo do permeado para diferentes tipos de águas durante a ultrafiltração por gravidade.

Fonte: Varbanets et al. (2011) - Adaptado.

Varbanets et al. (2011) e Chomiak et al. (2014) identificaram em seus trabalhos que a estabilização do fluxo se dá pela formação do biofilme na membrana de ultrafiltração. A formação de biofilmes nas superfícies da membrana é geralmente considerada prejudicial, pois os desempenhos de filtração diminuem. No entanto, controlar a formação de biofilmes continua desafiador e requer uma demanda significativa de energia e limpeza química. O processo de ultrafiltração por GDM desenvolveu um novo paradigma para sistemas operacionais de membrana que consiste em aproveitar a presença de biofilmes em suas superfícies.

Importância do Biofilme aderido à membrana UF

Durante a filtração UF-GDM, os microrganismos, partículas coloidais, matéria orgânica e inorgânica presentes na água de alimentação são acumulados na superfície da membrana. Estas substâncias retidas na membrana tendem a formar uma camada de biofilme, que é considerado como “mini sistema ecológico” (PRONK et al., 2019). A formação de biofilmes nas membranas ajuda a estabilizar o fluxo de permeado ao longo de vários meses. A composição da água de alimentação determina a estrutura física e bioquímica dos biofilmes e, em última instância, sua resistência hidráulica. O biofilme também ajuda a aumentar a qualidade do permeado, visto que a retenção de compostos biodegradáveis ou vírus é maior no caso de um ‘biofilme + membrana’.

A caracterização do biofilme em UF-GDM é um assunto complexo, uma vez que inclui uma gama de diferentes campos, tais como (1) morfologia (2) estrutura dimensional); (3) Atividade biológica (4) Composição da comunidade (procariotos e eucariotos, incluindo predadores) e sua distribuição espacial. A formação de biofilmes na superfície das membranas resulta tanto na acumulação de produtos microbianos solúveis e crescimento bacteriano (FLEMMING, 2011). As bactérias presentes na superfície das membranas se alimentam de compostos biodegradáveis contidos na água de alimentação, e formam uma matriz de exopolímeros (substâncias poliméricas extracelulares-EPS) (LOOSDRECHT et al., 2012). A matriz de EPS atua como uma substância aderente, que mantém as bactérias ligadas entre si e à superfície da membrana,

aumentando assim a resistência hidráulica (DERLON et al., 2012; DERLON et al., 2016; DESMOND et al., 2018).

Na Figura 2 é possível visualizar a formação do biofilme na superfície da membrana.

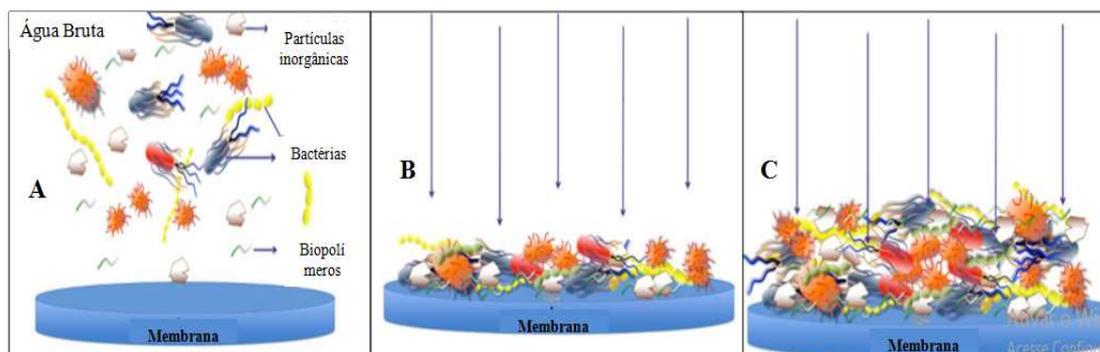


Figura 2: Formação do biofilme na superfície da membrana. (A) Água de alimentação contendo microrganismos, material particulado e dissolvido (B) Depósito de microrganismos, material particulado e dissolvido na membrana. (C) Espessura da camada de biofilme aumenta com o tempo. **Fonte:** Varbanets et al. (2011) - Adaptado.

A comunidade microbiana do biofilme afeta a sua estrutura física na escala de alguns microns até alguns milímetros, e assim a sua resistência hidráulica. A formação de biofilme que tem uma estrutura homogênea e compacta resulta em fluxo de permeado relativamente baixo de cerca de $5 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^2$ (DERLON et al., 2012). Por outro lado, uma formação heterogênea resulta em valores mais elevados de fluxo de permeado de até $20 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^2$. Vários autores afirmam que a retenção dos compostos é mais elevada para os sistemas biofilme-membrana através de uma combinação de processos biológicos e físicos. O uso de sistemas compostos de biofilme-membrana faz com que seja possível aumentar a retenção dos seguintes compostos: carbono orgânico assimilável (AOC) (DERLON et al., 2014); toxinas microbianas, tais como cianotoxinas (KOHLENER et al., 2014; SILVA et al., 2018) e polímeros orgânicos, tais como polissacarídeos (CHOMIAK et al., 2014).

Novos estudos estão sendo realizados com o objetivo de analisar a importância da formação de biofilme na membrana. Derlon et al. (2012) identificaram que a formação de biofilme altamente permeável, devido à presença de eucariotos, em particular, de metazoários é um mecanismo chave que aumenta a permeabilidade da membrana. Em média, a predação por nematódeos e oligoquetas geram um aumento do fluxo de permeado de cerca de 100% em comparação com os valores medidos na ausência de predação. Nematódeos e oligoquetas criam biofilmes mais permeáveis devido à sua ação de motilidade e construção de micro habitats. Assim, a resistência hidráulica do biofilme não se relaciona apenas com a sua espessura, mas também a sua heterogeneidade (MARTIN et al., 2014).

Tendo em destaque a influência de metazoários no fluxo de permeado, a hipótese de que estes tipos de seres vivos podem ser utilizados para modular a resistência de fluxo de biofilmes foi realizado estudo experimental por Klein et al. (2016). Os autores enriqueceram o biofilme bacteriano com oligoqueta *Aelosoma hemprichi* e com o nematóide *Aquatilis plectus*. Foi observado aumento do fluxo de 50% após a adição de *A. plectus* e até mais de 150% devido à adição de oligoquetas (*A. hemprichi*) em relação a membrana controle. Na Figura 3 é possível observar o efeito da predação por eucariotos sobre a estrutura dos biofilmes desenvolvidos na superfície da membrana de ultrafiltração. A composição da comunidade

biológica do biofilme foi influenciada, não só em termos de metazoários em si, mas também da composição de protozoários e bactérias. Estes resultados demonstram que a presença de eucariotos pode ser manipulada para ajustar a resistência do fluxo do biofilme.

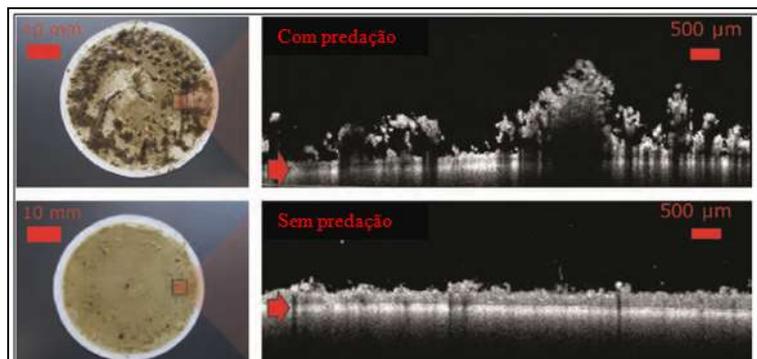


Figura 3: Efeito da predação por eucariotos sobre a estrutura dos biofilmes desenvolvidos na superfície da membrana de ultrafiltração. **Fonte:** Derlon et al. (2014).

O biofilme também apresenta influência sobre diversos compostos, a exemplo do Carbono orgânico disponível (COD). O COD é um indicador de possível crescimento bacteriano na água. Quanto menor a concentração de carbono orgânico, mais limitado é o risco de crescimento bacteriano. Via de regra, uma quantidade significativa de carbono orgânico assimilável passa pelas membranas, causando um risco significativo de desenvolvimento de bactérias patogênicas na água filtrada (PREST et al., 2016). Utilizando um sistema de ultrafiltração por GDM para tratamento de água Derlon et al. (2014) investigaram a qualidade do permeado em termos de conteúdo de carbono orgânico assimilável (COA) e frações de carbono orgânico dissolvido (por exemplo, biopolímeros). Os resultados indicaram que a membrana de ultrafiltração virgem remove uma pequena fração do COA e dos biopolímeros (rejeição <10%), quando ocorre presença de um biofilme fino e jovem na superfície das membranas de ultrafiltração a qualidade do permeado aumentou devido à degradação do COA (> 80%).

Vários fatores influenciam a formação do biofilme nas membranas, dentre eles destaca-se: A composição da água a ser tratada; as condições de operação, tais como a pressão transmembranar; a composição das comunidades microbianas presente no biofilme; e a temperatura que pode influenciar no crescimento microbiano e alterar a estabilização do fluxo (PRONK et al., 2019). Vários estudos afirmam que o biofilme formado nos sistemas UF-GDM apresenta-se positivos, visto que o fluxo da água ainda é suficiente para atender demanda familiar e a remoção de compostos orgânicos, torna-se mais eficiente, devido à presença da comunidade bacteriana.

Remoção de microrganismos e microcontaminantes

A remoção de microrganismo é um fator importante no processo UF-GDM, visto que a água potável deve estar isenta de patógenos. O estudo publicado por Clasen et al. (2009) é um dos pioneiros na utilização do processo de UF-GDM para o tratamento de água destinada ao consumo humano. Com o objetivo de verificar a eficiência do processo UF-GDM para remoção dos microrganismos *Escherichia coli*, *Cryptosporidium parvum* e o vírus colifago MS2, os autores utilizaram um cartucho de membrana de

ultrafiltração de fibra oca (26 cm de comprimento) realizando limpeza periódica e retrolavagem, o dispositivo produzia água tratada a uma taxa média de 143 mL/min (8,6 L/hora). A água de estudo apresentava turbidez moderada (15NTU). Após tratamento por UF-GDM ocorreram reduções significativas dos microrganismos: *E. coli* (99,9999%), Vírus colifago MS2 (99,99%) e (99,9%) para cistos dos protozoários *Cryptosporidium parvum*. Ao final do estudo observou-se que o sistema foi capaz de produzir 20.000 L de água tratada.

As comunidades de microrganismos que se desenvolvem dentro do biofilme também ajudam a degradar as toxinas microbianas, em particular os metabólitos das cianobactérias as chamadas cianotoxinas. Na verdade, a maioria das cianotoxinas não são retidas apenas pelas membranas. Os microrganismos presentes na comunidade microbiana do biofilme da membrana são capazes de usar essas toxinas como fonte de carbono (SILVA et al., 2018). Diferentes bactérias aeróbias (por exemplo, *Variovorax paradoxus*) e anaeróbias (*Aeromonas hydrophila*) são, portanto, capazes de degradar microcistinas. A adaptação da comunidade microbiana de biofilmes de membrana pode permitir a eliminação completa de microcistinas.

Com o objetivo de verificar a eficiência do processo UF-GDM na remoção de microcistinas, alguns autores em 2014 monitoraram um sistema durante 24 dias. O sistema funcionou a uma pressão hidrostática de 0,65 mbar. A água de alimentação foi enriquecida com células de *Microcystis aeruginosa* e com a microcistina-LR. Os resultados mostraram que o fluxo médio do permeado foi de 4,7 L m⁻² h⁻¹. Após 15 dias de operação, o sistema cuja membrana apresentava biofilme obteve 100% de remoção para MC-LR (concentração inicial de 400 µg.l⁻¹), enquanto que para o sistema sem a presença do biofilme, a taxa de remoção foi de 80%, apresentando residual de 80 µg.l⁻¹ na água filtrada. Os principais táxons encontrados no biofilme formado no sistema e que estava relacionados com a degradação da MC-LR foram: Deltaproteobacteria, Fibrobacteres, Alphaproteobacteria, Betaproteobactérias, Firmicutes e Gammaproteobacteria. Os autores afirmam que a ultrafiltração GDM fornece uma maneira rápida e eficiente de remover MCs da água destinada ao consumo humano.

A formação de biofilmes na membrana também contribuem para degradação de polímeros e proteção da membrana contra obstrução irreversível. Os biofilmes de membrana atuam como uma primeira barreira biológica e protegem a membrana da adsorção de compostos responsáveis pela obstrução irreversível, como os polissacarídeos (CHOMIAK et al., 2014). A comunidade microbiana que se desenvolve dentro dos biofilmes é capaz de degradar completamente os polissacarídeos de baixo peso molecular (menores que o tamanho dos poros da membrana), também ajudam a reter/hidrolisar/degradar polissacarídeos com um grande peso molecular (ou seja, maior do que o tamanho dos poros da membrana).

Outros estudos também estão sendo desenvolvidos utilizando o sistema GDM combinado com outros processos. Recentemente vários autores relatam pré tratamento da água de alimentação, entre os tratamentos, destaca-se: processo de adsorção, processo de coagulação, filtração, entre outros. Também existem estudos que incorporam na membrana, partículas desinfectantes como prata coloidal. Pronk et al. (2018) adicionaram uma camada de carvão ativado granular (GAC) e uma camada de carvão ativado alimentado (PAC) para tratamento da água da chuva. Verificou-se que melhorou a eficiência de remoção de 20-25% de orgânicos visto que GAC e PAC podem efetivamente adsorver compostos fluorescentes (por

exemplo, proteínas aromáticas, proteínas triptofano e húmicos).

Wang et al. (2017) descreveram um método fácil para preparar membranas de ultrafiltração carregadas de prata para aplicações de desinfecção no ponto de uso. A membrana com incorporação de prata alcançou um fluxo de água de alta pureza, demonstrando a viabilidade da filtração por gravidade com eficiência energética e eliminando a necessidade de energia elétrica. A forte atividade antibacteriana e a alta rejeição física da membrana levaram a um excelente poder de desinfecção, não sendo detectadas células bacterianas viáveis em sua água permeada.

Os resultados de remoção de microrganismos e microcontaminantes obtidos no processo UF-GDM são promissores e podem contribuir significativamente na produção de água potável e de fácil acesso.

Implantação e custos da tecnologia de tratamento de água UF-GDM

Caso de sucesso utilizando o processo de ultrafiltração por GDM já é relatado na comunidade científica, Peter Verbans et al., (2017) relatam que foram implantados (pela Universidade de Ciências Aplicadas e Artes do Noroeste da Suíça em parceria com o Instituto Federal Suíço de Ciência e Tecnologia Aquática) quiosques que tratam água por UF-GDM em três escolas nas proximidades do Lago Vitória, em Uganda, lá os moradores podem comprar água potável tratada. Sistemas simples de filtração por membrana removem o material turvo, bactérias e vírus da água, garantindo assim que um número significativamente menor de pessoas faça uso de água poluída. Como resultado, a diarreia em crianças menores de cinco anos diminuiu 69% e, em adultos, surpreendentes 78%. A manutenção dos filtros de membrana operados é simples; eles funcionam sem adição permanente de produtos químicos e não requerem entrada de energia. Enquanto os sistemas convencionais de ultrafiltração funcionam com alta pressão e precisam ser limpos regularmente, os filtros desenvolvidos em Uganda funcionam apenas por gravidade e com baixa manutenção.

Um dos entraves da utilização da tecnologia UF-GDM são os custos relacionados às membranas, em alguns países os valores ainda são altos, dificultando o uso pela população mais carente. Recentemente Lee et al. (2020) realizaram um levantamento de custos de várias tecnologias POU no tratamento de água. O processo UF-GDM mostrou-se muito atraente. Estima-se que a cada 1000 L de água tratada é gasto uma média de US\$ 3,84, o que permitiria o tratamento doméstico de água em países de baixa e média renda, atendendo aos requisitos mínimos diários de água de uma família de cinco pessoas.

As pesquisas que estudam o processo UF-GDM estão em expansão e são de suma importância para o tratamento de água no ponto de uso. O sistema UF-GDM apresenta-se como tecnologia inovadora e eficiente para populações que não possuem acesso a água tratada ou ingerem água de fontes inseguras. É importante realizar estudos de aplicabilidade e viabilidade financeira como forma de garantir que o sistema possa ser utilizado por aqueles que mais necessitam.

CONCLUSÕES

A tecnologia UF-GDM apresenta-se como excelente alternativa ao tratamento de água no ponto de

uso. Operado em pressões relativamente baixas (40-65 cm de coluna d'água), apresenta capacidade de fornecer média de 4-10 h⁻¹.m⁻² de água tratada. Os resultados indicam que a qualidade microbiológica da água melhora consideravelmente, apresentando taxa de remoção acima de 99,9% para retenção de microrganismos. O sistema UF-GDM não necessita de fornecimento de energia e pode operar por vários meses sem realizar retrolavagem da membrana. O biofilme formado no interior da membrana de ultrafiltração, apresenta alta capacidade de retenção de compostos orgânicos, a exemplos das cistoxinas como as microcistinas e o carbono orgânico, com potencial de até 100% de remoção desses compostos. UF-GDM pode ser considerado como um tratamento alternativo, eficaz e baixo custo, fornecendo água tratada destinada ao consumo humano em locais de não dispõem de fonte acessível de água.

REFERÊNCIAS

- ACHESON, D. W. K.. Alimentos e doenças transmitidas pela água. **Encyclopedia of Microbiology**, p.365-81, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00183-8>
- BOUSEETTINE, R.; HASSOU, N.; BESSI, H.; ENNAJI, M. M.. Waterborne Transmission of Enteric Viruses and Their Impact on Public Health. **Emerging and Reemerging Viral Pathogens**, p.907-932, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-819400-3.00040-5>
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Dispõe sobre o novo marco do saneamento do Brasil. Brasília: DOU, 2020.
- CABRAL, J. P.. Water microbiology. Bacterial pathogens and water. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.7, n.10, p.3657-3703, 2010. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijerph7103657>
- CHAIDEZ, C.; RODRÍGUEZ JUNIOR, I.; TORRES, J. B. V.; SOTO, M.; GERBA, C. P.; DEL CAMPO, N. C.. Point-of-use Unit Based on Gravity Ultrafiltration Removes Waterborne Gastrointestinal Pathogens from Untreated Water Sources in Rural Communities. **Wilderness Environ Med.**, v.27, n.3, p.379-85, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wem.2016>
- CHOMIAK, A.; MIMOSO, J.; KOETZSCH, S.; SINNET, B.; PRONK, W.; DERLON, N.; MORGENTH, E.. Biofilm formation and permeate quality improvement in Gravity Driven Membrane ultrafiltration. **Water Science & Technology Water Supply**, v.14, n.2, p.274-282, 2014.
- CLASEN, T.; NARANJO, J.; FRAUCHIGER, D.; GEBRA, C.. Laboratory assessment of a gravity-fed ultrafiltration water treatment device designed for household use in low-income settings. **American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v.80, n.5, p.819-823, 2009.
- DERLON, N.. Predation influences the structure of biofilm developed on ultrafiltration membranes. **Water Research**, v.46, p.3323-3333, 2012.
- DERLON, N.. Presence of biofilms on ultrafiltration membrane surfaces increases the quality of permeate produced during ultra-low pressure gravity-driven membrane filtration. **Water Research**, v.60, p.164-173, 2014.
- DERLON, N.. The composition and compression of biofilms developed on ultrafiltration membranes determine hydraulic biofilm resistance. **Water Research**, v.102, p.63-72, 2016.
- DÉSILLE, D.. **Guide pratique**. Conservation et traitement de l'eau à domicile. Programme Solidarité Eau, 2012.
- DESMOND, P.. Linking composition of extracellular polymeric substances (EPS) to the physical structure and hydraulic resistance of membrane biofilms. **Water Research**, v.132, p.211-221, 2018.
- EPA. Environmental Protection Agency. **EPA 815-R-06-010: Point-of-Use or Point-of Entry Treatment Options for Small Drinking Water Systems**. EPA, 2006.
- FLEMMING, H.-C.. **Microbial Biofouling: Unsolved Problems, Insufficient Approaches, and Possible Solutions**. 5 ed. Biofilm Highlights, Springer Series on Biofilm, 2011.
- GOMES, F. M. S.; SANTO, M. C. C. E.; GRYSHECK, R. C. B.; BERTOLOZZI, M. R.; FRANÇA, F. O. S.. Acesso à água potável e tratamento de esgoto no Brasil: um desafio para o controle de doenças infecciosas de veiculação hídrica. **Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo**, v.62, n.e71, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-9946202062071>
- KOHLER, E.; VILLIGER, J.; POSCH, T.; DERLON, N.; SHABAROVA, T.; MORGENTH, E.; PERNTHALER, J.; BLOM, J. F.. Biodegradation of Microcystins during Gravity-Driven Membrane (GDM) Ultrafiltration. **Plos One**, v.9, n.11, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0111794>
- LEE, S. S.; PASPALOF, A. M.; SNOW, D.; RICHMOND, E. K.; MARSHALL, R.. Ocorrência e potenciais efeitos biológicos das anfetaminas nas comunidades ribeirinhas. **Environmental Science & Technology**, v.50, n.17, p.9727-35, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1021/acs.est.6b03717>
- LOO, S.-L.; FANE, A. G.; KRANTZ, W.; LIM, T.. Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. **Water Research**, v.46, n.10, p.3125-3151, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.030>
- LOOSDRECHT, M. C. M.; BERESCHENKO, L.; RADU, A.;

KRUIHOF, J. C.; PICIOREANU, C.; JOHNS, M. L.; VROUWENVELDER, H. S.. New approaches to characterizing and understanding biofouling of spiral wound membrane systems. **Water Science and Technology**, v.66, n.1, p.88-94, 2012. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2012.096>

MARTIN, K. J.; REFORÇAR, D.; DERLON, N.; MORGENROTH, E.; NERENBERG, R.. Effect of fouling layer spatial distribution on permeate flux: A theoretical and experimental study. **Journal of Membrane Science**, v.471, p.130-137, 2014.

MUÑOZ, S. I.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; SANTOS, C. B.; SANCHEZSWEATMAN, O.. Revisão sistemática de literatura e metanálise: noções básicas sobre seu desenho, interpretação e aplicação na área da saúde. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMUNICAÇÃO EM ENFERMAGEM, 8. Anais. Ribeirão Preto, 2002.

PAIVA, R. F.; SOUZA, M. F.. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cad. Saúde Pública**, v.34, n.1, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/0102-311X00017316>

POOI, C. K.; NG, H. Y.. Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. **NPJ Clean Water**, v.1, n.11, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41545-018-0011-0>

PREST, E.; HAMMES, F.; LOOSDRECHT, M. C. M.; VROUWENVELDER, J. S.. Biological stability of drinking water: controlling factors, methods and challenges. **Frontiers in Microbiology**, v.7, 2016.

PRONK, W.; DING, A.; MORGENROTH, E.; DERLON, N.; DESMOND, P.; BURKHARDT, M.; WU, B.; FANE, A. G.. Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment: a review. **Water Research**, v.148, p.553-565, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.062>

SILVA, M. O. D.; BLOM, J. F.; YANKOVA, Y.; VILLIGER, J.; PERNTHALER, J.. Priming of microbial microcystin degradation in biomass-fed gravity driven membrane filtration biofilms. **Systematic and Applied Microbiology**, v.41, p.221-231, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.syam.2017>

SOBSEY, M.; STAUBER, C.; CASANOVA, L.; BROWN, J.; ELLIOTT, M.. Point of use household drinking water filtration: a practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world. **Environmental Science & Technology**, v.42, n.12, p.4261-4267, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1021/es702746n>

TANG, X.; DING, A.; QU, F.; JIA, R.; CHANG, H.; CHENG, X.; LIU, B.; LI, G.; LIANG, H.. Effect of operation parameters on the flux stabilization of gravity-driven membrane (GDM) filtration system for decentralized water supply. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, p.16771-16780, 2016. DOI: <http://doi.org/23.10.1007/s11356-016-6857-0>

VARBANETS, M. P.; DREYER, K.; MCFADDEN, N.; OUMA, H.; WANYAMA, K.; ETENU, C.; MEIERHOFER, R.. Evaluating novel gravity-driven membrane (GDM) water kiosks in schools. The future of water, sanitation and hygiene in low-income countries. Innovation, adaptation and engagement in a changing world. In: WEDC INTERNATIONAL CONFERENCE, 40. Anais. Loughborough: WEDC, 2017.

VARBANETS, M. P.; JOHNSTON, R.; MEIERHOFER, R.; KAGE, F.; PRONK, W.. **Gravity-driven membrane disinfection for household drinking water treatment**. 2011.

WANG, D.; HAN, B.; LI, S.; CAO, Y.; DU, X.; LU, T.. Environmental fate of the anti-parasitic ivermectin in an aquatic micro-ecological system after a single oral administration. **Peer J**, v.7, 2019. DOI: <http://doi.org/10.7717/peerj.7805>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157860478406361089/>