

Avaliação da Eficácia do Método SODIS no Tratamento de Água no Bairro de Mutauanha, 2025

Evaluation of the Effectiveness of the SODIS Method for Water Treatment in the Mutauanha Neighborhood, 2025

Autores:

1-Nadira Momade Nurkhane- Nadiranurkhan5@gmail.com ...+258 862951225
Licenciado Em Ciências Farmacêuticas (Farmacêutica),FCS-Faculdade de Ciências de Saúde da Unilúrio - Universidade Lúrio ...<https://www.unilurio.ac.mz> ...info@unilurio.ac.mz ...Bairro de Marrere, Rua Número 4250, Km 2,3-Nampula. .Telefone:+25826218250// 26 218 250.

2-Graciano Cumaquela - gcumaquela@unilurio.ac.mz –+258861613577. Licenciado Em Ciências Farmacêuticas (Farmacêutico),FCS-Faculdade de Ciências de Saúde da Unilúrio – Universidade Lúrio...<https://www.unilurio.ac.mz>. ..info@unilurio.ac.mz...Bairro de Marrere, Rua Número 4250, Km 2,3-Nampula. .Telefone:+25826218250// 26 218 250.

3-Ribeiro Vasco Ribeiro - rribeiro@unilurio.ac.mz –+258842178404. Licenciado Em Ciências Farmacêuticas (Farmacêutico),FCS-Faculdade de Ciências de Saúde da Unilúrio - Universidade Lúrio...<https://www.unilurio.ac.mz>. ..info@unilurio.ac.mz...Bairro de Marrere, Rua Número 4250, Km 2,3-Nampula. .Telefone:+25826218250// 26 218 250.

4-Ezequias Zefanias Siteo – ezequias5siteo@gmail.com_+258869681453. Licenciado Em Análises Clínicas e Mestre Em Epidemiologia de Campo e Laboratorial- FELTP- Doutorando em Inovação Educativa. Faculdade de Ciências de Educação e Comunicação-Universidade Católica de Moçambique (FEC-UCM). Av. 25 de Setembro, Número 512, Bairro central, Cidade de Nampula- Moçambique, C.P:681,70100. E-mail: fec@ccm.ac.mz...Telefone :26 215 478....+258876895898.

Filiação :

1;2;3-FCS-Faculdade de Ciências de Saúde da Unilúrio-Universidade Lúrio...<https://www.unilurio.ac.mz>. ..info@unilurio.ac.mz...Bairro de Marrere, Rua Número 4250, Km 2,3-Nampula. .Telefone:+25826218250// 26 218 250.

4 -Hospital Central de Nampula (HCN)-Laboratório Central de Análises Clínicas (LAC) -Sector de Microbiologia-Bacteriologia-hcnampula@gmail.com...Avenida Samora Machel, Número 1061,Telefone : 26 213001, C.P 14.Cidade de Nampula.

RESUMO

A contaminação microbiológica da água destinada ao consumo humano permanece como um dos principais problemas de saúde pública em comunidades periurbanas de países de baixo e médio rendimento. Em Moçambique, o surto nacional de cólera entre 2022 e 2024, com a província de Nampula como epicentro, evidenciou a necessidade de intervenções complementares de tratamento ao ponto de uso. O presente estudo teve por objectivo avaliar a eficácia do método de desinfecção solar da água (SODIS) na melhoria da qualidade microbiológica e físico-química da água de poços comunitários do bairro de Mutauanha, cidade de Nampula, em 2025. Realizou-se um estudo experimental de comparação pareada intra-amstral em três poços (A, B e C), com amostras avaliadas em três momentos: antes da exposição solar (T0), após seis horas de exposição em garrafas PET (T6h) e após 72 horas de armazenamento à temperatura ambiente (T+72h). Mediu-se o pH, turbidez, temperatura e condutividade eléctrica, pesquisou-se coliformes totais, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae* e *Proteus spp.* nas três amostras, segundo os *Standard Methods* e normas ISO aplicáveis. Os três poços apresentaram, em T0, turbidez entre 3,26 e 3,39 NTU, pH entre 6,64 e 6,94 e contaminação fecal detectável (*E. coli* de 12 a mais de 50 UFC/100 mL e coliformes totais entre 5 e 7 UFC/100 mL); o Poço B apresentou ainda *Proteus spp.* positivo. Após seis horas de exposição, observou-se inactivação completa de *E. coli* e de coliformes totais nas amostras A e C, e persistência transitória de *E. coli* (3 UFC) na Amostra B, com inactivação completa após 72 horas, evidenciando o fenómeno de morte continuada no escuro (*dark death*). Não houve recrescimento bacteriano em qualquer amostra após 72 horas. As reduções microbiológicas atingiram ordem $\geq 1,3$ log na amostra C e $\geq 1,7$ log na Amostra A. A turbidez diminuiu entre 10% e 33% após exposição. Conclui-se que o SODIS é tecnicamente eficaz, sustentável, de baixo custo e adequado ao contexto periurbano de Mutauanha, podendo integrar estratégias locais de saúde pública para a redução da carga de doenças de veiculação hídrica.

Palavras-chave: Água; desinfecção; *Escherichia coli*; Mutauanha, SODIS, Nampula.

ABSTRACT

Microbiological contamination of drinking water remains a leading public health concern in peri-urban communities of low and middle income countries. In Mozambique, the 2022–2024 national cholera outbreak, centred in Nampula province, exposed the need for complementary point-of-use treatment interventions. This study aimed to evaluate the effectiveness of the solar water disinfection (SODIS) method in improving the microbiological and physicochemical quality of water from community wells in Mutauanha neighbourhood, Nampula city, in 2025. A quasi-experimental within-sample paired comparison study was conducted on three wells (A, B and C), with samples assessed at three timepoints: before solar exposure (T0), after six hours of exposure in PET bottles (T6h), and after 72 hours of storage at ambient temperature (T+72h). pH, turbidity, temperature and electrical conductivity were measured; total coliforms, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae* and *Proteus spp.* were investigated following Standard Methods and applicable ISO standards. At T0 the wells showed turbidity between 3.26 and 3.39 NTU, pH between 6.64 and 6.94, and detectable faecal contamination (*E. coli* from 12 to over 50 CFU/100 mL and total coliforms from 5 to 7 CFU/100 mL); Well B was additionally positive for *Proteus spp.* After six hours of solar exposure, complete inactivation of *E. coli* and total coliforms was observed in Samples A and C, and transient persistence of *E. coli* (3 CFU) in Sample B, with full inactivation after 72 hours, evidencing the dark death phenomenon. No bacterial regrowth was detected in any sample after 72 hours. Microbiological reductions reached ≥ 1.3 log in Sample C and ≥ 1.7 log in Sample A. Turbidity decreased between 10% and 33% after exposure. The SODIS method proved technically effective, sustainable, low-cost and appropriate for the peri-urban context of Mutauanha, and can be integrated into local public health strategies to reduce the burden of waterborne diseases.

Keywords: water; disinfection; *Escherichia coli*; Mutauanha; SODIS, Nampula.

1.0 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável segura constitui um dos principais desafios contemporâneos de saúde pública, com impacto directo na morbimortalidade, na nutrição infantil e no desenvolvimento socioeconómico das populações. Segundo o relatório de 2025 do WHO/UNICEF *Joint Monitoring Programme* (JMP), em 2024 cerca de 2,1 mil milhões de pessoas ainda não dispunham de serviços de água potável geridos de forma segura, das quais cerca de 700 milhões careciam mesmo do serviço básico e 106 milhões consumiam água directamente de fontes de superfície sem qualquer tratamento (WHO/UNICEF, 2025). A nível mundial persistem desigualdades pronunciadas: enquanto a Europa e a América do Norte apresentam coberturas de água gerida com segurança próximas dos 94%, a África Subsariana atinge apenas 31%, configurando uma das iniquidades sanitárias mais marcantes da actualidade (WHO/UNICEF, 2025).

A Organização Mundial da Saúde estima que pelo menos 1,7 mil milhões de pessoas consomem água contaminada por matéria fecal, situação directamente associada à transmissão de doenças como diarreia, cólera, febre tifóide e disenteria (WHO, 2022). A análise mais abrangente disponível, publicada na Lancet por Wolf e colaboradores em 2023, atribuiu à inadequação da água, saneamento e higiene (WASH) cerca de 1,4 milhões de mortes e 73,9 milhões de anos de vida ajustados por incapacidade em 2019, com 90% desta carga concentrada em países de baixo e médio rendimento (Wolf, 2023). O Global Burden of Disease Study 2021 atribuiu, especificamente às doenças diarreicas 1,17 milhões de óbitos em 2021, com a fracção mais elevada nas crianças menores de cinco anos (GBD, 2021). Estas estimativas reforçam o reconhecimento da água segura como bem público essencial e como pilar para o cumprimento do Objectivo de Desenvolvimento Sustentável n.º 6 (ODS 6), que estabelece a meta de acesso universal e equitativo a água potável segura até 2030 (UN, 2015).

Apesar de décadas de investimentos internacionais, os sistemas convencionais de tratamento centralizado da água continuam inadequadamente distribuídos em vastas

regiões do mundo, particularmente em comunidades rurais e periurbanas com infra-estruturas limitadas (Prüss,2019;WHO,2019;Sobsey,2008). Mesmo quando existem fontes consideradas melhoradas, a contaminação fecal é frequentemente detectada no ponto de consumo, em consequência de armazenamento doméstico inadequado, intermitência do abastecimento e manuseamento incorrecto (Bain,2014). Este reconhecimento tem motivado o desenvolvimento e a recomendação de tecnologias de tratamento ao ponto de uso (Household Water Treatment, HWT), nas quais a barreira sanitária final é colocada o mais próximo possível do consumo, idealmente no próprio domicílio (WHO,2019&Sobsey,2008).

Entre as tecnologias HWT disponíveis, a desinfecção solar da água (método SODIS, *Solar Water Disinfection*) destaca-se pela sua simplicidade, baixo custo e adequação a contextos de recursos limitados. O método consiste na exposição de água em garrafas de polietileno tereftalato (PET) à radiação solar directa durante seis horas em dias soalheiros, inactivando bactérias, vírus e diversos protozoários patogénicos através da combinação sinérgica da radiação ultravioleta (UV-A e UV-B), da geração intracelular de espécies reactivas de oxigénio e do efeito térmico (McGuigan,2012; García,2021&Castro,2016). Estudos laboratoriais e ensaios de campo documentam reduções de 4 a 6 log na carga bacteriana de *E. coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella spp.* e *Shigella spp.* em condições óptimas (McGuigan,2012;García,2021;Castro,2016; Umar,2023), e ensaios clínicos randomizados em comunidades rurais demonstraram redução estatisticamente significativa de episódios diarreicos em crianças (Conroy,1996 & Mäusezahl,2009). A região do sul de África dispõe de irradiância solar entre as mais elevadas a nível mundial, conferindo elevado potencial climatológico para a aplicação do SODIS durante a maior parte do ano (Moreno,2021).

Moçambique apresenta um quadro particularmente exigente de acesso a água e saneamento. De acordo com o Inquérito sobre o Orçamento Familiar (IOF) 2019/20 do Instituto Nacional de Estatística (INE), 55,7% da população dispõe de uma fonte de água considerada segura para consumo, mas apenas 31% utiliza saneamento gerido de forma segura, com fortes desigualdades entre meios urbano e rural (INE,2021&World Bank,2024). Diversas comunidades, em particular nas áreas

periurbanas das maiores cidades e nas zonas rurais, dependem maioritariamente de poços escavados e furos manuais cuja qualidade microbiológica é frequentemente comprometida por proximidade a latrinas, escoamento superficial em épocas chuvosas e ausência de protecção estrutural adequada (Bain,2014&Graham,2013). A trajectória actual de investimento público no sector indica que o país não atingirá as metas do ODS 6 em 2030 sem intervenções complementares de baixo custo, escaláveis e dirigidas à barreira final do consumo (Rebelo,2024).

A vulnerabilidade epidemiológica nacional ficou patente no surto de cólera iniciado em Setembro de 2022 e prolongado até 2024, considerado o maior dos últimos vinte anos no país, com mais de 48 751 casos cumulativos em 93 distritos. A província de Nampula foi a mais afectada, registando milhares de casos e dezenas de óbitos confirmados (WHO,2024&Siamalube,2025).Esta evolução é agravada pelas alterações climáticas e por eventos extremos, como ciclones e cheias, que mobilizam matéria fecal acumulada no ambiente e contaminam poços e cursos de água (Graham,2013&Maúre,2018). No quadro local, o bairro de Mutauanha, na cidade de Nampula, caracteriza-se por elevada densidade populacional, ocupação informal do solo, infra-estrutura limitada de abastecimento canalizado e dependência de poços rasos comunitários para o consumo doméstico, configurando um cenário paradigmático em que tecnologias HWT simples, designadamente o SODIS, poderiam ter impacto sanitário relevante (Maúre,2021&Phiri2023).

Apesar do potencial técnico e da plausibilidade biológica do SODIS para o contexto moçambicano, a evidência empírica directamente gerada em comunidades periurbanas de Moçambique é escassa: a maioria dos estudos de campo africanos foi realizada na África Oriental e Austral (Quénia, Etiópia, Tanzânia, Malawi) e na África Ocidental (Nigéria), com poucos trabalhos documentados em Nampula e nenhum, até à data, em Mutauanha (Conroy,1996;Umar2023;Phiri,2023;Bitew,2020; Brockliss,2022).

2.0 OBJECTIVOS

2.1 Objectivo Geral

- ❖ Avaliar a eficácia do método de desinfecção solar (SODIS) na melhoria da

qualidade microbiológica e físico-química da água de poços comunitários utilizados para consumo humano no bairro de Mutauanha, cidade de Nampula, em 2025.

2.2 Objectivos Específicos

- ❖ Caracterizar os parâmetros físico-químicos da água, pH, turbidez, temperatura e condutividade eléctrica, antes e após a aplicação do método SODIS;
- ❖ Determinar a presença e a contagem semi-quantitativa de coliformes totais e de *Escherichia coli* como indicadores de contaminação fecal nas amostras antes e após a aplicação do método SODIS;
- ❖ Pesquisar a presença de *Vibrio cholerae* nas amostras antes e após a aplicação do método SODIS;
- ❖ Pesquisar a presença de *Shigella spp.* nas amostras antes e após a aplicação do método SODIS;
- ❖ Pesquisar a presença de *Salmonella spp.* nas amostras antes e após a aplicação do método SODIS.

3.0 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Água Potável e Saúde Pública

A água potável é definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como aquela que pode ser consumida ao longo de toda a vida sem causar risco significativo à saúde, devendo apresentar características microbiológicas, físico-químicas, organolépticas e radiológicas compatíveis com os padrões internacionalmente aceites para o consumo humano (WHO,2022). Trata-se de um conceito normativo e funcional, que articula a necessidade fisiológica de hidratação ao princípio do direito humano à saúde, e que se materializa em parâmetros mensuráveis definidos pelas Guidelines for Drinking-Water Quality, actualmente na quarta edição com a primeira e segunda adendas (WHO,2022).

Os critérios microbiológicos constituem o pilar mais sensível desta definição. A OMS recomenda que, em água destinada ao consumo humano, esteja ausente *Escherichia coli* ou coliformes termotolerantes em qualquer amostra de 100 mililitros, e que coliformes totais não estejam presentes em água tratada que sai das estações de tratamento (WHO,2022). Esta exigência baseia-se no pressuposto epidemiológico

de que a detecção destes microrganismos sinaliza contaminação fecal recente e apresenta risco potencial de exposição a agentes patogénicos como *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae*, rotavírus e protozoários parasitas (Cabral, 2010; Edberg, 2000; Ramírez, 2015). A simplicidade, sensibilidade e baixo custo do método tornam a pesquisa de coliformes e de *Escherichia coli* a base operacional da vigilância sanitária da qualidade da água em todo o mundo (Edberg, 2000).

Os critérios físico-químicos abrangem parâmetros como o pH (recomendado entre 6,5 e 8,5), a turbidez (idealmente inferior a 1 unidade nefelométrica de turbidez, NTU, e nunca superior a 5 NTU na saída do tratamento), a condutividade eléctrica, a dureza, a temperatura, a concentração de nitratos, nitritos, cloretos, sulfatos, ferro, manganês, flúor e a presença de substâncias químicas tóxicas como o arsénio, chumbo e o cádmio (WHO, 2022). Estes parâmetros, muitas vezes não tem impacto agudo na saúde, condicionam a eficácia de tratamentos como a cloração e a desinfecção solar, influenciam directamente a aceitabilidade do consumo pela população (WHO, 2022 & García 2021).

Os critérios organolépticos, cor, sabor, odor e turbidez, determinam, na prática, a adesão das populações ao consumo de uma determinada fonte de água. Água tecnicamente segura mas com cor amarelada, sabor metálico ou odor desagradável é frequentemente rejeitada pelos utilizadores, que retornam a fontes alternativas potencialmente contaminadas, comprometendo as estratégias de saúde pública (WHO, 2022 & Tamas, 2011). Por esse motivo, a OMS sublinha que a aceitabilidade organoléptica não é um aspecto secundário mas sim um determinante operacional de segurança da água ao nível domiciliar (WHO, 2022).

3.2 Contexto de Moçambique

3.2.1 Situação do Abastecimento de Água

Moçambique apresenta, segundo o Inquérito do Orçamento Familiar (IOF) 2019/20 do Instituto Nacional de Estatística (INE), uma cobertura nacional de água considerada segura para consumo de 55,7%, ao passo que o saneamento gerido de forma segura abrange apenas 31% da população (INE, 2021). Os indicadores do Banco Mundial confirmam o padrão: o serviço básico de água potável cobre cerca de 64% da população moçambicana, mas o acesso a serviços geridos de forma segura

permanece marginal e fortemente concentrado nas áreas urbanas (World Bank,2024& Rebelo,2024).

A diferença entre meios urbano e rural é particularmente acentuada. Estima-se que cerca de 84% dos agregados urbanos disponham de pelo menos serviço básico de água, contra aproximadamente 40% dos agregados rurais (World Bank,2024; Rebelo,2024; WaterAid,2021). Esta assimetria reflecte décadas de subinvestimento nas áreas rurais e periurbanas, bem como a fragilidade institucional dos operadores municipais em regiões periféricas (Rebelo,2024). A meta nacional de cobertura universal até 2030, alinhada com o ODS 6, exige um aumento médio anual da cobertura significativamente superior ao registado na década anterior, o que tem motivado a aposta em programas como o Projecto Água Segura para Vilas e Zonas Rurais e a Estratégia Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento Rural (ENASAR) 2030, (WaterAid,2021&Governo de Moçambique,2023).

O Ministério da Saúde de Moçambique tem documentado, em sucessivos relatórios anuais, a relação entre cobertura insuficiente de água segura e a recorrência de surtos de cólera, disenteria e diarreias agudas, sobretudo durante a época das chuvas e nos períodos pós-ciclone, quando a infiltração de águas superficiais nos poços rasos é maximizada (Governo de Moçambique,2023&MISAU/SISMA,2024). Estes dados sustentam, do ponto de vista nacional a relevância de tecnologias complementares de tratamento domiciliar como o método SODIS.

3.2.2 Situação da Província de Nampula

A Província de Nampula concentra cerca de um ($1/5=20\%$)quinto da população nacional e constitui, em termos absolutos, um dos territórios com maior número de pessoas sem acesso a água segura no país (INE,2021&Rebelo,2024). Relatórios sectoriais nacionais e dados da Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento indicam que, embora tenham sido construídas centenas de fontes de água em distritos da província ao longo dos últimos anos, a cobertura urbana permanece próxima de 42% e a cobertura rural depende fortemente de pequenos sistemas dispersos e de fontes individuais(Rebelo,2024;WaterAid,2021;Governo de Moçambique,2023).

Os problemas sanitários da província articulam-se com factores epidemiológicos: durante o surto nacional de cólera de 2022 a 2024, Nampula foi a província mais afectada, registando milhares de casos e dezenas de óbitos, o que motivou intervenções da OMS, do UNICEF e de organizações parceiras, incluindo campanhas de vacinação oral, distribuição de kits de tratamento domiciliário e promoção de boas práticas WASH(WHO/AFRO,2024;MISAU/SISMA,2024;UNICEF,2024). O uso disseminado de poços comunitários rasos, muitos deles abertos, sem cobertura adequada e próximos de latrinas, constitui um dos vectores de risco mais relevantes para a continuidade da transmissão hídrica de patógenos entéricos na província (Graham,2013&Sorensen,2015).

3.2.3 Bairro de Mutauanha

O Bairro de Mutauanha caracteriza-se como uma zona urbana e periurbana da cidade de Nampula, marcada por elevada densidade populacional, ocupação informal do solo, infra-estruturas básicas limitadas e ausência ou intermitência de rede pública de abastecimento de água canalizada. Em virtude destas limitações, a população depende maioritariamente de poços escavados e furos manuais para satisfazer as necessidades domésticas, incluindo água destinada ao consumo humano. A vulnerabilidade socioambiental do bairro é agravada pela coexistência de latrinas tradicionais e fontes de água em curtas distâncias, pelo escoamento superficial inadequado em períodos chuvosos e pelo histórico recorrente de doenças de veiculação hídrica documentado pelos serviços distritais de saúde.

A dependência de águas subterrâneas pouco profundas constitui o eixo central do risco sanitário em Mutauanha. Estes aquíferos são particularmente vulneráveis a contaminação fecal por infiltração lateral e vertical proveniente de latrinas, lixos a céu aberto, animais domésticos e enxurradas em períodos de chuva intensa (Graham,2013;Sorensen,2015;Gleeson,2012).Esta combinação fisiográfica e social explica por que comunidades com perfil semelhante ao de Mutauanha são frequentemente apontadas como prioritárias para a implantação de intervenções domiciliárias de tratamento de água, como o SODIS(Conroy,1996;Umar,2023 ;WaterAid,2021).

3.2.4 Principais Doenças Associadas

As diarreias infecciosas constituem síndromes clínicas caracterizadas pelo aumento da frequência e diminuição da consistência das fezes, podendo ser de etiologia viral (rotavírus, norovírus, adenovírus entéricos), bacteriana (*E. coli* enteropatogénica e enterotoxigénica, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Campylobacter spp.*) ou parasitária (*Cryptosporidium spp.*, *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolytica*) (GBD,2021&Ramírez,2015). A magnitude do problema é considerável: estima-se que ocorram entre 4 a 6 episódios por criança e por ano em países de baixo rendimento, contribuindo substancialmente para mortalidade e morbilidade infantis (GBD,2021& Prüss,2019). Ensaio clínicos randomizados demonstraram que o método SODIS reduz episódios diarreicos em comunidades expostas a água microbiologicamente contaminada (Conroy,1996;Mäusezahl,2009;Phiri,2023), constituindo uma intervenção relevante para a redução desta carga de doença.

3.3 Contaminação Microbiológica da Água

A contaminação microbiológica da água destinada ao consumo humano tem origem maioritariamente fecal e resulta da introdução, directa ou indirecta, de matéria fecal humana ou animal nos corpos hídricos. As fezes humanas, descarregadas em latrinas tradicionais não estanques, em fossas sépticas mal dimensionadas ou directamente no ambiente, constituem o veículo primário dos patógenos entéricos que motivam as principais doenças de veiculação hídrica em África Subsariana (Graham,2013;Cabral,2010;Sorensen,2015). A elevada densidade populacional em bairros periurbanos, combinada com a coexistência espacial de latrinas e fontes de água, amplifica este risco,(Graham,2013).

As fezes animais, em particular de bovinos, suínos, aves e roedores, contribuem significativamente para a carga microbiológica das fontes superficiais e subterrâneas próximas de zonas de pastoreio e habitação rural (Ramírez,2015&Sorensen,2015). Adicionalmente, infiltrações originadas em redes de saneamento defeituosas, lixeiras a céu aberto e cemitérios podem introduzir microrganismos patogénicos no subsolo, contaminando aquíferos pouco profundos (Sorensen,2015&Gleeson,2012).

As inundações periódicas e as enxurradas, frequentes em Moçambique durante a

estação chuvosa, mobilizam grandes volumes de matéria fecal acumulada no ambiente e introduzem-na, por escoamento superficial, em poços, furos e cursos de água, com consequente amplificação do risco de surtos de cólera e diarreias agudas (Maúre,2018&MISAU/SISMA,2024). Diversas actividades humanas como lavagem de roupa, banho, dessedentação animal e descarga de efluentes domésticos e industriais completam o quadro das fontes de contaminação microbiológica (Cabral,2010& Sorensen,2015).

3.4 Tratamento de Água para Consumo Humano

Os métodos convencionais de tratamento de água para consumo humano incluem clarificação por coagulação-floculação e sedimentação, filtração rápida em areia, filtração lenta em areia, desinfecção química (cloração, ozonização, dióxido de cloro), desinfecção física por radiação ultravioleta artificial e processos de membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa),(WHO,2019). A combinação destes processos em estações centralizadas permite, em contextos de elevado investimento e gestão competente, produzir água gerida de forma segura para grandes populações urbanas (WHO,2022).

A cloração permanece a tecnologia de desinfecção química mais utilizada à escala global, devido ao seu baixo custo, simplicidade operacional e capacidade de manter residual nas redes de distribuição (WHO,2019).É, contudo, sensível à matéria orgânica, ao pH e à temperatura, com eficácia reduzida contra *Cryptosporidium* e potencial formação de subprodutos de desinfecção indesejáveis. A filtração por areia, em sistemas convencionais ou de filtração lenta, é igualmente uma tecnologia bem estabelecida, capaz de remover sólidos em suspensão, parte da matéria orgânica e fracção substancial de microrganismos (WHO,2019). A ozonização e a radiação UV artificial são mais dispendiosas e tecnologicamente exigentes, sendo adoptadas sobretudo em sistemas urbanos avançados ou em aplicações industriais (WHO, 2022).

3.5 Método SODIS

O método SODIS (Solar Water Disinfection) foi proposto pela primeira vez em 1980

por Aftim Acra et.al, da Universidade Americana de Beirute, no Líbano, ao observarem a inativação rápida de microrganismos em água armazenada em recipientes transparentes expostos à luz solar (McGuigan,2012&Sommer,1997). O desenvolvimento sistemático do método deve-se ao Instituto Federal Suíço de Ciência e Tecnologia Aquáticas (Eawag), através do seu Departamento de Água e Saneamento para Países em Desenvolvimento (Sandec), que ao longo das décadas de 1990 e 2000 conduziu investigação fundamental e ensaios de campo extensos que conferiram ao SODIS estatuto de tecnologia recomendada para utilização ao ponto de uso (McGuigan,2012;Sommer,1997;Eawag,2002;Wegelin,1994).

A disseminação mundial do método foi impulsionada por estudos seminais conduzidos por Wegelin et.al, na Suíça e em diversos contextos internacionais (Sommer,1997&Wegelin,1994), bem como por ensaios clínicos em África, na América Latina e na Ásia que documentaram benefícios na redução da diarreia infantil (Conroy,1996;Mäusezahl,2009;Islam2015). Hoje, o SODIS é utilizado por milhões de pessoas em mais de 50 países, sobretudo em África Subsariana, América Latina e Sudeste Asiático, com programas implementados em parceria com organizações governamentais, organizações não governamentais e agências das Nações Unidas (McGuigan,2012;Castro,2016;Cháuque ,2021).

3.5.1 Conceito do SODIS

O SODIS é definido como o processo de inativação de microrganismos patogénicos em água destinada ao consumo humano por exposição à radiação solar em recipientes transparentes, sob condições padronizadas de tempo e intensidade luminosa(McGuigan,2012&García,2021).O princípio operacional combina três mecanismos sinérgicos: acção germicida da radiação ultravioleta (especialmente UV-A, 320 a 400 nm, e fracção residual de UV-B, 280 a 320 nm), produção fotoquímica de espécies reactivas de oxigénio no interior das células e na fase aquosa, efeito térmico associado ao aquecimento da água, que potencia a acção fotoquímica acima de aproximadamente 45 °C (McGuigan,2012;García,2021;Castro,2016;García,2022).

O método é, em essência, uma intervenção de custo marginal próximo de zero, na

medida em que utiliza apenas radiação solar e garrafas PET recicladas. Pela sua simplicidade, baixo custo, ausência de subprodutos químicos e independência relativa de infra-estruturas é reconhecido como tecnologia apropriada para comunidades vulneráveis, com ampla aceitação pela OMS e pela Eawag (WHO, 2019; McGuigan, 2012; Conroy, 1996).

3.6 Materiais Utilizados

As garrafas de polietileno tereftalato (PET) são o recipiente padrão recomendado para SODIS. As características ideais incluem capacidade até 2 litros, transparência elevada à radiação UV-A e visível, paredes finas (que minimizam a atenuação da radiação) e ausência de aditivos como bisfenol A, ftalatos ou estabilizadores opacos que possam migrar para a água (McGuigan, 2012; García 2021; Lawrie, 2015). Estudos de dosimetria UV demonstram que as garrafas PET transmitem entre 60% e 90% da radiação UV-A incidente em função da espessura, idade e estado de conservação, sendo recomendada a substituição periódica das garrafas após meses de utilização (Lawrie, 2015 & Eawag, 2002).

Investigação subsequente avaliou recipientes alternativos. Garrafas de vidro permitem desempenho equivalente ou superior em condições tropicais, mas têm custo, peso e fragilidade superiores (Fisher, 2012). Recipientes de polipropileno transparente foram propostos como alternativa mais durável, com algumas evidências de eficácia, embora estudos recentes indiquem que polipropileno transparente novo pode ser parcialmente inadequado por absorver muito UV-A, sublinhando a importância de garrafas PET selectivas (WHO, 2019 & O'Dowd, 2023). Sistemas de larga escala (jerrycans de 5 a 25 L, baldes de 20 L, reactores de fluxo contínuo com colectores parabólicos compostos, CPC) têm sido desenvolvidos para superar a limitação de volume associada às garrafas individuais e melhorar a adesão comunitária (Conroy, 1996; Brockliss, 2022; Chaúque, 2021, O'Dowd, 2023; Amatobi 2022; Ubomba, 2010; García, 2022).

3.6.1 Procedimento Operacional

O procedimento clássico do SODIS, conforme padronizado pela Eawag/Sandec,

compreende as seguintes etapas. Em primeiro lugar, a recolha da água deve provir de uma fonte com turbidez aceitável (idealmente inferior a 30 NTU), com pré-filtração através de tecido ou sedimentação prévia em caso de turbidez superior (McGuigan,2012&Eawag,2002). Em segundo lugar, a água é introduzida nas garrafas PET até cerca de três ($3/4=75\%$)quartos do volume, agitando-se vigorosamente durante 30 segundos para promover oxigenação e enriquecimento em oxigénio dissolvido, condição importante para a formação de ROS (McGuigan,2012;Castro,2016;Eawag,2002).

Em terceiro lugar, as garrafas são completamente cheias e tapadas, e seguidamente colocadas em posição horizontal sobre uma superfície reflectora (como telha de zinco ondulada) ou em local com exposição solar directa, sem sombreamento, durante pelo menos 6 horas em dias soalheiros, ou 48 horas em dias nublados (McGuigan,2012& Eawag,2002). Por fim, a água tratada deve ser consumida directamente da garrafa ou transferida para recipientes limpos com fecho, devendo ser armazenada em local protegido para evitar recontaminação (Sobsey,2008&Eawag,2002).Variações do protocolo, uso de reflectores adicionais, lentes de Fresnel ou colectores parabólicos, são reportadas com ganhos marginais a substanciais em condições específicas (Brockliss,2022; Amatobi,2022;Ubomba,2010;Vivar,2021).

3.6.2 Radiação Ultravioleta Solar

A radiação solar que atinge a superfície terrestre apresenta três faixas espectrais ultravioletas relevantes: UV-C (100 a 280 nm), UV-B (280 a 320 nm) e UV-A (320 a 400 nm). A UV-C, intensamente germicida, é praticamente toda absorvida pela camada de ozono na estratosfera, não atingindo a superfície (McGuigan,2012& García,2021).A UV-B, com efeito directo sobre o ácido desoxirribonucleico (DNA) por formação de dímeros de pirimidina (sobretudo dímeros de timina e fotoprodutos 6-4), atinge a superfície em quantidades reduzidas mas suficientes para contribuir para a inactivação microbiana, especialmente em latitudes tropicais (McGuigan,2012; García,2021;Castro,2016).

A UV-A constitui a fracção dominante e mais relevante para o SODIS. Embora menos energética por fotão que a UV-B, atravessa eficazmente recipientes PET e penetra

significativamente na coluna de água, sendo responsável pela maior parte da dose UV incidente disponível para inactivação microbiana (García,2021;Castro,2016; Ubomba,2009). A sua acção biológica é predominantemente indirecta, mediada pela fotoexcitação de cromóforos endógenos (flavinas, quinonas, citocromos) que geram espécies reactivas de oxigénio capazes de danificar lípidos, proteínas e ácidos nucleicos (Castro,2016;Samoili,2022;García,2022;Berney,2006).

4.0 METODOLOGIA

4.1 Tipo, Abordagem e Delineamento do Estudo

O Estudo é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e delineamento descritivo-experimental, conduzido em condições reais de campo numa comunidade periurbana (Polit,2021&Hulley,2013).Com objectivo de fornecer evidência operacional sobre uma intervenção concreta de saúde pública, o método de desinfecção solar da água (SODIS), para um problema prioritário no bairro de Mutauanha,Cidade de Nampula: a contaminação microbiológica da água de poços comunitários utilizados para consumo humano (McGuigan,2012;Umar, 2023;Phiri,2023).

A abordagem quantitativa assente na mensuração objectiva, padronizada e comparativa de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água antes e após a aplicação do SODIS, conforme orientações reconhecidas para avaliação de tecnologias de tratamento ao ponto de uso (WHO,2022&APHA,2023).O delineamento adoptado correspondeu a um estudo experimental de comparação pareada intra-amstral (pré-pós), no qual cada amostra de água funcionou como o seu próprio controlo, permitindo eliminar a variabilidade entre fontes e isolar o efeito atribuível à intervenção (Hulley,2013).

Cada amostra foi avaliada em três momentos sequenciais: tempo zero (T0), imediatamente antes da exposição solar; tempo seis horas (T6h), imediatamente após a exposição solar de seis horas; e tempo setenta e duas horas (T+72h), após três dias de armazenamento à temperatura ambiente em condições controladas de laboratório. Esta estrutura temporal permitiu avaliar simultaneamente a eficácia imediata do SODIS, o fenómeno de morte continuada no escuro (dark death) e o risco de recontaminação ou de reactivação de células no estado viável mas não

culturável (VBNC) durante o armazenamento doméstico simulado (McGuigan,2012; Castro,2016; Berney,2006).

4.1 Local e Período do Estudo

O Estudo foi realizado no bairro de Mutauanha, cidade de Nampula, Província de Nampula, região norte de Moçambique. A área de estudo caracteriza-se como uma zona urbana e periurbana com elevada densidade populacional, ocupação informal do solo, ausência ou intermitência da rede pública de abastecimento de água canalizada e cobertura limitada de saneamento básico (INE,2021). A população local depende maioritariamente de poços escavados e furos manuais para satisfazer necessidades domésticas, incluindo o consumo humano (República de Moçambique,2021).

A selecção da área justificou-se pela conjugação de três factores: a sua reconhecida vulnerabilidade socioambiental, o histórico recorrente de doenças de veiculação hídrica no distrito de Nampula, incluindo surtos de cólera registados entre 2022 e 2024 com a província de Nampula como epicentro nacional (WHO,2022&INE,2021); e o seu enquadramento climatológico tropical, com elevada irradiância solar média anual, condição habilitante para a aplicação técnica do SODIS (Moreno,2021). O trabalho de campo decorreu durante o ano de 2025, em dias seleccionados pela ausência de nebulosidade significativa, de modo a garantir condições de irradiância adequadas ao protocolo (McGuigan,2012& Eawag,2002).

As análises laboratoriais foram conduzidas no Laboratório de Análises Clínicas do Hospital Central de Nampula, instituição de referência regional doptada das estruturas e dos meios de cultura necessários para a realização dos ensaios microbiológicos e físico-químicos planeados.

4.2 População, Universo e Amostra

O universo da pesquisa foi constituído pelo conjunto de poços de captação de água utilizados pela população do bairro de Mutauanha. Considerando a impossibilidade de inventariação exaustiva das fontes e a natureza piloto e exploratória do estudo, recorreu-se à amostragem não probabilística por conveniência, modalidade

frequentemente utilizada em estudos ambientais e sanitários em contextos comunitários com limitações logísticas (Polit,2021&Hulley,2013).

Foram seleccionados três poços (designados Poço A, Poço B e Poço C), em consonância com a dimensão e o desenho de outros estudos pré-piloto de avaliação de SODIS em comunidades vulneráveis (Umar,2023;Brockliss,2022;Chidya,2021). Apesar de o número de fontes ser limitado, o desenho de comparação pareada intra-amstral (pré-pós) confere ao estudo poder estatístico adequado para detectar variações intra-poço, função primária da análise (Hulley,2013).

4.3 Caracterização dos Poços Estudados

Os três poços incluídos (Poço A, Poço B e Poço C) foram caracterizados quanto à localização, profundidade, estrutura física, tipo de revestimento, presença de cobertura, presença de mecanismo de retirada de água e proximidade a potenciais fontes de contaminação. Todos os poços apresentaram profundidade aproximada de 10 a 12 metros, classificando-se como poços rasos ou de aquífero superficial, condição reconhecidamente associada a maior vulnerabilidade microbiológica (Cabral,2010& República de Moçambique,2021).

O Poço A encontra-se afastado de cursos de água superficiais e apresentava revestimento interno em blocos de cimento, sem cobertura. O Poço B localiza-se em maior proximidade a um curso de água, com revestimento interno em pneus reutilizados e sem cobertura, configurando, à partida, o cenário hidrogeologicamente mais vulnerável e potencialmente mais sujeito a infiltrações laterais provenientes do escoamento superficial. O Poço C apresentava revestimento em pneus reutilizados e cobertura parcial em chapa de zinco, conferindo-lhe protecção estrutural superior, embora ainda sujeito a abertura durante a retirada da água. Nenhum dos três poços dispunha de bomba manual instalada, sendo a água retirada por recipientes acoplados a cordas, prática documentadamente associada a recontaminação por contacto repetido com o ambiente externo (Cabral,2010& República de Moçambique,2021).

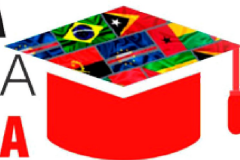


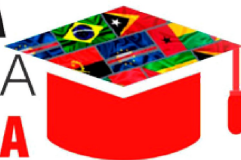
Figura 1: Poços comunitários A, B e C Estudados no Bairro de Mutauanha.

4.4 Procedimentos de Colheita das Amostras

A colheita das amostras foi conduzida segundo princípios de assepsia microbiológica recomendados pela ISO 19458:2006 e pelas Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF, 24ª edição), (APHA, 2023 & ISO 19458:2006). As amostras foram recolhidas no período da manhã, entre as 04h30 e as 05h30, antes da exposição solar significativa do dia, de modo a minimizar pré-inactivação por radiação ambiente e a captar a condição basal da fonte.

Cada amostra foi recolhida directamente do poço utilizando uma garrafa de PET previamente higienizada e desinfectada, acoplada a uma corda dedicada à amostragem (separada da utilizada habitualmente pela família). A garrafa foi introduzida cuidadosamente no poço para evitar agitação excessiva e ressuspensão de sedimentos, cheia até cerca de três quartos do volume nominal de 1,5 litro. As amostras foram imediatamente identificadas com etiqueta indelével contendo o código do poço, a data, a hora exacta de colheita e a temperatura ambiente registada no momento.

Após a colheita, as amostras destinadas à análise inicial foram acondicionadas em caixa térmica isolante contendo gelo recolhido em embalagem impermeável, à temperatura aproximada de 4 °C, e transportadas em menos de 60 minutos para o Laboratório de Análises Clínicas do Hospital Central de Nampula (LAC-HCN), em conformidade com a ISO 5667-3:2018 sobre preservação e transporte de amostras de água para análise microbiológica (ISO 5667-3:2018).



4.4.1 Protocolo de Aplicação do Método SODIS

O método SODIS foi aplicado segundo o protocolo padronizado pela Eawag/Sandec, com adaptações para as condições locais (McGuigan,2012;Eawag,2002; Wegelin,1994;Luzi,2016). Foram utilizadas garrafas de PET transparentes, descartáveis, com capacidade nominal de 1,5L, sem coloração e em bom estado de conservação (sem fissuras, raspões pronunciados ou opacidade).As garrafas foram previamente lavadas com água potável, enxaguadas internamente com solução de hipoclorito de sódio a 0,1%, enxaguadas várias vezes com água destilada estéril até remoção total de resíduos do desinfectante.

Cada garrafa foi cheia até três quartos do volume com a amostra de água do respectivo poço, tampada, e agitada vigorosamente durante 30 segundos para promover oxigenação e enriquecimento em oxigénio dissolvido, factor que potencia a formação intracelular de espécies reactivas de oxigénio durante a exposição solar (Castro,2016&Luzi,2016). Em seguida, as garrafas foram completamente cheias, tapadas e colocadas em posição horizontal sobre uma superfície reflectora (chapa de zinco ondulada), em local com exposição solar directa, sem sombreamento, entre as 9h00 e as 15h00, perfazendo seis horas contínuas de exposição.



Figura 2: Garrafas PET de 1,5 L preparadas e identificadas para a aplicação do método SODIS, correspondentes às amostras A, B e C.

Durante a exposição foram monitorizadas e registadas, em intervalos horários, a temperatura ambiente, a temperatura da água no interior de uma garrafa-sentinela (termómetro digital introduzido por orifício vedado) e a presença de nuvens. A

temperatura ambiente registada nos dias de ensaio variou entre 35,0 °C e 37,6 °C, a temperatura interna máxima das garrafas atingiu aproximadamente 42 °C, e o índice UV local foi estimado em aproximadamente 6, valores compactíveis com aplicação eficaz do SODIS em latitudes tropicais (McGuigan,2012; García,2021;Moreno,2021; Ubomba,2009).

Após o período de seis horas de exposição, as garrafas foram retiradas e transportadas em caixa isotérmica para o laboratório, onde se procedeu à análise microbiológica e físico-química imediata. As amostras tratadas foram subsequentemente armazenadas à temperatura ambiente (25 a 28 °C) em condições controladas de laboratório, no escuro, durante 72 horas, sendo então reanalisadas para avaliação de morte no escuro e da estabilidade microbiológica pós-tratamento (Castro,2016& Berney,2006).

5.0 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

5.1 Resultados Físico-Químicos

O controlo negativo, constituído por água purificada (destilada estéril), foi analisado para avaliar a estabilidade e a fiabilidade dos instrumentos de medição e para descartar interferências analíticas. As medições mostraram elevada consistência intra-réplicas (Tabela 1): a condutividade eléctrica variou entre 41,9 e 42,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (média 42,0; coeficiente de variação, CV, 0,19%), o pH oscilou entre 6,95 e 7,17 (média 7,04; CV 1,34%), a temperatura manteve-se constante em 28,5°C e a turbidez registou 0,0 NTU em todas as réplicas.

Tabela 1: Resultados do controlo negativo (água purificada) nos testes físico-químicos.

Parâmetro	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Média	CV (%)
Condutividade($\mu\text{S}/\text{cm}$)	42,1	42,0	41,9	42,0	0,19
pH	7,17	7,00	6,95	7,04	1,34
Temperatura (°C)	28,5	28,5	28,5	28,5	0,00
Turbidez (NTU)	0,0	0,0	0,0	0,0	—

A elevada consistência observada confirma a estabilidade instrumental e a ausência de contaminantes interferentes na água-veículo do controlo, requisito essencial para a validade dos resultados experimentais. Estudos contemporâneos demonstram que a precisão na medição de parâmetros físico-químicos, pH, turbidez e condutividade,

é determinante para a interpretação adequada da qualidade da água e dos respectivos riscos sanitários (WHO,2022). A baixa variabilidade observada está em conformidade com as boas práticas laboratoriais descritas pelas Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, que enfatizam a necessidade de calibração rigorosa e repetibilidade das medições (APHA,2023).

5.1.2 Resultados físico-químicos das amostras dos poços A, B e C

Os resultados físico-químicos das amostras de água dos três poços comunitários são apresentados na Tabela 2, comparando os valores antes da aplicação do SODIS (T0), imediatamente após seis horas de exposição solar (T6h) e após 72 horas de armazenamento (T+72h).

Tabela 2: Resultados físico-químicos das amostras dos poços A, B e C antes e após a aplicação do SODIS.

Amostra	Parâmetro	T0	T6h	T+72h
A	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	980	1040	1040
A	pH	6,64	6,96	6,95
A	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	28,6	28,6	28,6
A	Turbidez (NTU)	3,39	3,05	3,05
B	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	773	829	829
B	pH	6,80	6,24	6,24
B	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	28,7	28,7	28,7
B	Turbidez (NTU)	3,35	2,70	2,70
C	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	1019	1056	1056
C	pH	6,94	6,76	6,76
C	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	28,5	28,4	28,4
C	Turbidez (NTU)	3,26	2,19	2,19

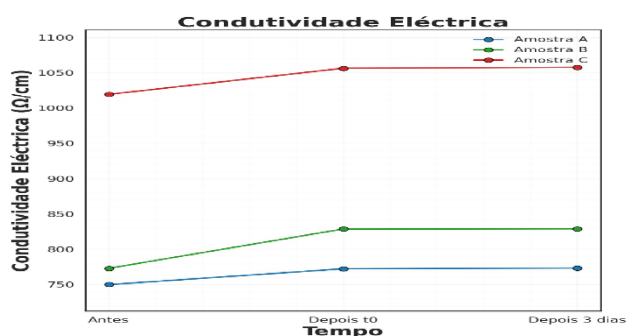


Figura 3: Variação comparativa da condutividade elétrica nas amostras A, B e C nos três momentos do estudo.

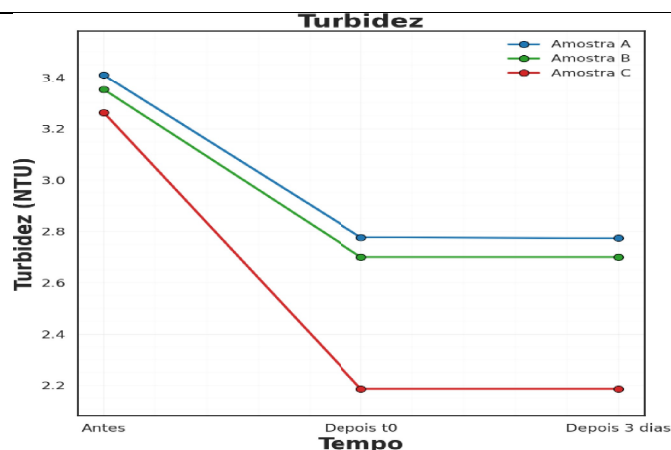


Figura 6: Variação comparativa da turbidez nas amostras A, B e C nos três momentos do estudo.

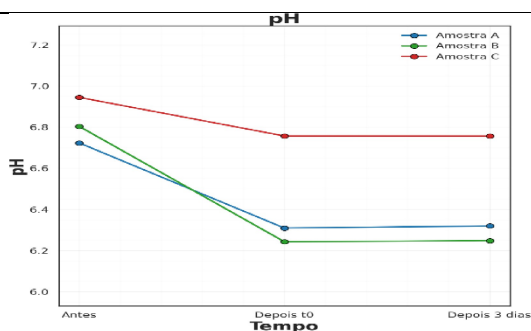


Figura 4: Variação comparativa do pH nas amostras A, B e C nos três momentos do estudo.

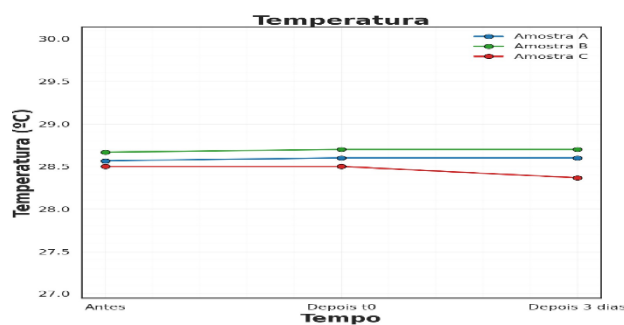


Figura 5: Variação comparativa da temperatura nas amostras A, B e C nos três momentos do estudo.

5.2 Turbidez: Análise e Discussão

A turbidez inicial das três amostras situou-se entre 3,26 NTU (Poço C) e 3,39 NTU (Poço A), valores que correspondem a aproximadamente um décimo do limite operacional de 30 NTU recomendado pela Eawag/Sandec para a aplicação directa do SODIS sem pré-tratamento (McGuigan,2012; García,2021,86). Esta condição inicial favorável ficou patente nos resultados, pois a transmissão da radiação ultravioleta na coluna de água é praticamente irrestrita em águas com turbidez inferior a 5 NTU, condição em que a dose UV-A acumulada não é significativamente atenuada por partículas em suspensão (García,2021&Lawrie,2015).

Após a exposição solar de seis horas, observou-se redução consistente da turbidez em todas as amostras: 10% no Poço A (3,39 → 3,05 NTU), 19% no Poço B (3,35 →

2,70 NTU) e 33% no Poço C (3,26 → 2,19 NTU). Este padrão é descrito na literatura como resultado da sedimentação natural de partículas suspensas durante o período em que as garrafas permanecem estáticas e ao sol, bem como da agregação coloidal facilitada pela elevação da temperatura interna (McGuigan,2012,García,2021; Kehoe,2001). Kehoe e colaboradores demonstraram que, mesmo em águas com turbidez superior a 100 NTU, o aumento do tempo de exposição até cerca de 8,5 horas pode compensar a atenuação óptica e atingir inactivação microbiológica completa (Kehoe,2001), resultado que coloca em evidência a margem de segurança técnica disponível nas amostras de Mutauanha, todas largamente abaixo do limite crítico.

Importa sublinhar que a redução da turbidez observada não constitui, por si só, uma medida de eficácia desinfectante, mas reflecte um benefício colateral relevante: melhora a aceitabilidade organoléptica da água tratada e tende a aumentar a adesão dos utilizadores ao método ao longo do tempo (Tamas,2011&Chaúque,2023). A estabilidade da turbidez após 72 horas de armazenamento confirma a ausência de ressuspensão de partículas, condição importante para a manutenção da qualidade da água ao nível domiciliár.

5.2.1 pH: Análise e Discussão

Os valores de pH inicial das três amostras situaram-se na faixa neutra (6,64 a 6,94), dentro do intervalo de 6,5 a 8,5 recomendado pelas Guidelines for Drinking-Water Quality da Organização Mundial da Saúde (WHO,2022). Após o tratamento, observou-se aumento do pH na Amostra A (6,64 → 6,96), aproximando-a da neutralidade absoluta, e ligeiras reduções nas Amostras B (6,80 → 6,24) e C (6,94 → 6,76). O valor pós-tratamento da Amostra B ficou marginalmente abaixo do limite inferior recomendado pela OMS, embora ainda dentro de uma faixa considerada aceitável para consumo humano em condições não corrosivas (WHO,2022). A literatura científica converge no entendimento de que o SODIS não induz alterações significativas no pH em condições padrão, dado que o método actua predominantemente sobre a viabilidade microbiana e não sobre a composição química mineral da água (McGuigan,2012;García,2021;Samoili,2022). Pequenas oscilações são geralmente atribuíveis a interações fotoquímicas com matéria

orgânica dissolvida, à libertação de CO_2 associada ao aquecimento ou à acidificação por ácidos húmicos foto-oxidados (García,2021&Giannakis,2015). Os resultados aqui observados são consistentes com este padrão e reforçam a robustez do método em águas com perfil físico-químico similar.

A variação ligeiramente acidificante na Amostra B merece interpretação contextual: tratando-se do poço com revestimento em pneus reutilizados e sem cobertura, em maior proximidade a um curso de água, é plausível que a presença de matéria orgânica dissolvida, posteriormente foto-oxidada, tenha gerado pequenas quantidades de ácidos orgânicos, conforme reportado em estudos sobre SODIS em águas superficiais com elevada carga orgânica (García,2021&Giannakis,2015).

5.2.2 Temperatura: Análise e Discussão

A Temperatura da água nas medições de bancada manteve-se praticamente constante (cerca de 28,4 a 28,7 °C), reflectindo o equilíbrio térmico atingido após o transporte e o processamento laboratorial das amostras. Importa distinguir esta temperatura analítica da temperatura efectivamente atingida no interior das garrafas durante a exposição solar, monitorizada em paralelo no campo, que oscilou em torno de 40 a 42 °C nas garrafas-sentinela, valor compatível com a dose calorífica esperada para a região de Nampula em dias de céu predominantemente limpo (Moreno,2021).

A literatura científica é consistente em estabelecer que o efeito térmico se torna determinante para a inactivação bacteriana acima de 45 °C, temperatura a partir da qual ocorre sinergia significativa entre a radiação UV e o calor (McGuigan,2012; García,2021;Samoili,2022; García,2022).Abaixo desse limiar, particularmente entre 12 e 40 °C, a inactivação ocorre predominantemente por mecanismos fotoquímicos: a radiação UV-B (280 a 320 nm) induz a formação de dímeros de pirimidina no mDNA, ao passo que a radiação UV-A (320 a 400 nm) gera, no interior das células, espécies reactivas de oxigénio (ROS), em especial o radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), o peróxido de hidrogénio (H_2O_2) e o oxigénio singlete ($^1\text{O}_2$), que oxidam lípidos de membrana, proteínas estruturais e enzimas antioxidantes como a catalase e a superóxido dismutase (Castro,2016;García,2022;Lawrie2015;Berney,2006;

Bosshard ,2010).

Nesta perspectiva, a eficácia microbiológica observada no presente estudo é interpretável como sendo predominantemente atribuível à acção fotoquímica da UV-A em sinergia parcial com o aquecimento moderado, com contribuição reduzida da pasteurização térmica. Esta conclusão é consistente com o trabalho de Lawrie et.al, que demonstraram que doses UV-A de aproximadamente 555 Wh/m² em garrafas PET, limiar empírico originalmente proposto por (Wegelin,1994) e amplamente utilizado na dosimetria contemporânea (Lawrie,2015), são suficientes para inactivação 3-log de bactérias entéricas mesmo em ausência de pasteurização, e com os resultados de Ubomba-Jaswa e colaboradores, que reportaram inactivação completa de *Escherichia coli* em reactores SODIS com temperatura da água inferior a 40 °C durante períodos de sol intenso (Ubomba,2010).

5.2.3 Condutividade Eléctrica: Análise e Discussão

A condutividade eléctrica apresentou pequeno aumento em todas as amostras após o tratamento, com variações de 6% no Poço A (980 → 1040 µS/cm), 7% no Poço B (773 → 829 µS/cm) e 4% no Poço C (1019 → 1056 µS/cm). Os valores absolutos enquadram-se em faixas tipicamente reportadas para águas subterrâneas tropicais, sem ultrapassar limites de aceitabilidade organoléptica da OMS (WHO,2022).

O ligeiro aumento observado é compatível com dois mecanismos sobrepostos: concentração relativa de sais dissolvidos por evaporação parcial da água, fenómeno comum em garrafas cheias até três quartos e expostas ao sol durante várias horas; e fotólise de compostos orgânicos com libertação de iões inorgânicos solúveis (McGuigan,2012&García2021).Crucialmente, a estabilidade da condutividade após 72 horas de armazenamento sugere ausência de lixiviação significativa de constituintes plásticos das garrafas PET, em conformidade com os trabalhos de Wegelin e colaboradores que documentaram a segurança química do uso de PET para aplicações domésticas de SODIS (Fisher,2012& Wegelin,1994).

Os Poços A e C, com condutividade acima de 1000 µS/cm, sinalizam carga iónica relativamente elevada, possivelmente associada à proximidade a fossas, infiltrações ou interacção com solos ricos em sais solúveis. O Poço B, com condutividade mais

baixa ($\sim 773 \mu\text{S/cm}$), pode reflectir maior diluição por águas superficiais provenientes do curso de água próximo, hipótese coerente com a sua maior variabilidade físico-química observada nos outros parâmetros.

5.3 Resultados Microbiológicos

O controlo negativo microbiológico, constituído por água purificada (destilada estéril), confirmou a fiabilidade dos procedimentos laboratoriais e a ausência de contaminação cruzada nos instrumentos, meios de cultura e fluxos operacionais. Não foi detectado crescimento de *Escherichia coli*, coliformes totais, *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* ou *Shigella spp.* em qualquer dos momentos avaliados, tempo zero e após 72 horas de conservação, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Resultados do controlo negativo microbiológico (água purificada).

Microrganismo	T0	T+72h	Interpretação
Escherichia coli	Ausente	Ausente	Conforme OMS
Coliformes totais	Ausente	Ausente	Conforme OMS
Salmonella spp	Ausente	Ausente	Conforme OMS
Vibrio cholerae	Ausente	Ausente	Conforme OMS
Shigella spp.	Ausente	Ausente	Conforme OMS

A obtenção de resultados negativos em todos os marcadores no controlo é um requisito metodológico inegociável para a validade científica de qualquer ensaio de desinfecção. Permite atribuir, com segurança, qualquer eventual crescimento microbiano observado nas amostras dos poços às condições endógenas das próprias fontes e não a contaminações laboratoriais. A escolha dos cinco microorganismos testados alinha-se com as recomendações da OMS para vigilância microbiológica da água potável (WHO,2022) e com o consenso científico de que *Escherichia coli* e coliformes totais constituem os indicadores primários de contaminação fecal recente (Edberg,2000), enquanto *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* e *Shigella spp.* representam patógenos clinicamente relevantes em contextos epidemiológicos de surto de cólera, febre tifóide e shigelose, todos endémicos na província de Nampula (WHO AFRO,2024& Cabral,2010).

A manutenção da esterilidade do controlo após 72 horas de armazenamento reforça igualmente a inexistência de células no estado viable but non-culturable (VBNC)

recuperáveis durante o intervalo do estudo. Berney et.al, demonstraram, recorrendo a citometria de fluxo, que bactérias submetidas a doses sub-letais de radiação podem perder a culturabilidade mas conservar integridade membranar e actividade metabólica residual, condição que pode comprometer a leitura puramente baseada em contagem em meio sólido (Berney,2006). A ausência de crescimento aos três dias confirma a estabilidade da água-veículo do controlo, fornecendo um padrão sólido para comparação.

5.3.1 Resultados microbiológicos das amostras A, B e C

Os resultados microbiológicos das três amostras dos poços comunitários são apresentados no Quadro 2, contemplando os três momentos temporais avaliados.

Quadro 2: Resultados microbiológicos das amostras A, B e C antes e após o SODIS.

Amostra	Parâmetro	T0	T6h	T+72h
A	E. coli (UFC/100 mL)	>50	Ausente	Ausente
A	Coliformes totais	7	Ausente	Ausente
A	Salmonella spp	Ausente	Ausente	Ausente
A	Vibrio cholerae	Ausente	Ausente	Ausente
A	Shigella spp.	Ausente	Ausente	Ausente
B	E. coli (UFC/100 mL)	12	3	Ausente
B	Coliformes totais	5	Ausente	Ausente
B	Proteus spp.	Presente	Ausente	Ausente
B	Salmonella spp	Ausente	Ausente	Ausente
B	Vibrio cholerae	Ausente	Ausente	Ausente
B	Shigella spp.	Ausente	Ausente	Ausente
C	E. coli (UFC/100 mL)	18	Ausente	Ausente
C	Coliformes totais	5	Ausente	Ausente
C	Salmonella spp.	Ausente	Ausente	Ausente
C	Vibrio cholerae	Ausente	Ausente	Ausente
C	Shigella spp.	Ausente	Ausente	Ausente

UFC = Unidades Formadoras de Colónias.

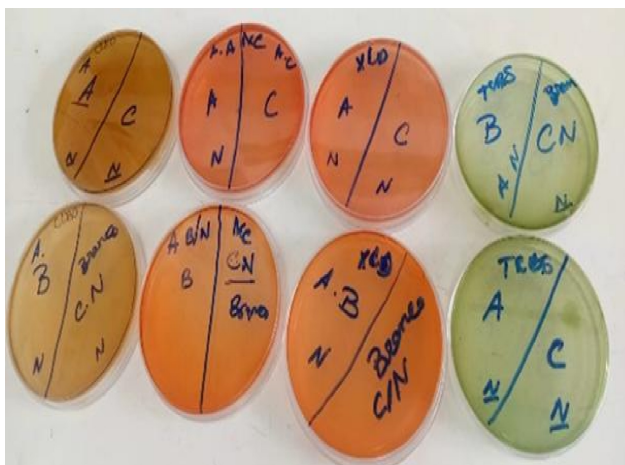
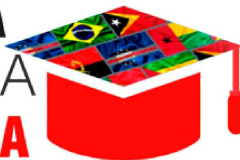


Figura 6: Placas de cultura selectiva e diferencial sementeas com amostras dos poços A, B e C nos diferentes momentos do estudo.



Figura 7: Detalhe das placas em Ágar EMB e Ágar MacConkey confirmando a ausência de crescimento bacteriano após a aplicação do SODIS.

5.3.2 Caracterização microbiológica basal (T0): análise e discussão

As três amostras apresentavam contaminação fecal detectável no tempo zero, configurando água imprópria para consumo humano directo segundo os critérios da OMS, que estabelecem ausência total de coliformes totais e de *Escherichia coli* em 100 mL de amostra como pré-requisito de potabilidade microbiológica (WHO, 2022&Edberg,2000). O Poço “A”apresentou a contaminação mais elevada, com mais de 50 UFC de *Escherichia coli* (limite máximo de contagem da técnica de placa utilizada), seguido pelos Poços C (18 UFC) e B (12 UFC). Estes valores indicam exposição directa e recente das fontes a matéria fecal humana ou animal, em conformidade com a literatura que identifica E. coli como o melhor indicador biológico para a vigilância da qualidade microbiológica de água potável (Edberg,2000).

A presença de coliformes totais (7; 5 e 5 UFC nas Amostras “A,B e C”, respectivamente) corrobora o quadro de contaminação fecal, embora o seu valor diagnóstico seja menor que o do *Escherichia coli* pelo facto de incluírem espécies ambientais não estritamente entéricas (Cabral,2010&Edberg,2000). A detecção de *Proteus spp.* exclusivamente no Poço “B” é particularmente significativa: trata-se de uma bactéria pertencente à família Enterobacteriaceae, frequentemente considerada indicador secundário de poluição fecal e de degradação ambiental por matéria orgânica em decomposição (Drzewiecka,2016).A sua presença associada a coliformes reforça a hipótese de que o Poço “B”, pela sua proximidade a um curso

de água, ausência de cobertura e revestimento em pneus reutilizados, é o mais vulnerável dos três às infiltrações superficiais e à entrada de matéria orgânica heterogênea.

O perfil de contaminação observado é compatível com a literatura africana sobre qualidade microbiológica de poços comunitários. Wamyil e colaboradores, num estudo de 2023 em Ishaka (Uganda), identificaram *Escherichia coli*, coliformes totais, *Salmonella*, *Shigella sp*, *Proteus sp* e *Staphylococcus aureus* em fontes comunitárias, concluindo que poços e nascentes da área eram significativamente contaminados e impróprios para consumo sem tratamento prévio (Wamyil,2023). Bain et.al, em meta-análise global, demonstraram que mais de metade das fontes consideradas melhoradas em África Subsariana apresentam contaminação fecal detectável no ponto de consumo (Bain,2014), achado que reforça a relevância da intervenção SODIS como barreira terminal.

A ausência inicial de *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* e *Shigella spp.*, nas três amostras é um dado relevante. Não significa que estes patógenos estejam ausentes do ambiente local, na verdade, a província de Nampula foi epicentro do surto nacional de cólera entre 2022 e 2024, com milhares de casos confirmados (WHO AFRO,2024), mas reflecte a distribuição típica destes microorganismos, frequentemente sob a forma de concentrações reduzidas e variáveis no tempo, especialmente em períodos inter-epidémicos (Cabral,2010). A vigilância destes patógenos continua, no entanto, a ser pertinente em qualquer ensaio de desinfecção, dado o seu potencial epidémico e a sua relevância clínica directa para a saúde pública em Mutuanha.

5.3.3 Eficácia imediata do SODIS (T6h): análise e discussão

Após seis horas de exposição solar, observou-se inactivação completa de *Escherichia coli* e de coliformes totais nas amostras A ($>50 \rightarrow 0$ UFC; redução $\geq 1,7$ log) e C ($18 \rightarrow 0$ UFC; redução $\geq 1,3$ log), com persistência transitória de *Escherichia coli* na Amostra B ($12 \rightarrow 3$ UFC; redução de 75% ou cerca de 0,6 log). A detecção de *Proteus spp.* no T0 da Amostra "B" desapareceu também imediatamente após a exposição, confirmando inactivação por mecanismos análogos aos descritos para

outras enterobactérias (Drzewiecka,2016). Não foram detectados *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* ou *Shigella spp.* em qualquer amostra em qualquer dos momentos.

O elevado desempenho do SODIS observado nas Amostras "A e C" é coerente com a vasta evidência laboratorial e de campo disponível para a inativação solar de bactérias entéricas. Berney et.al,documentaram em 2006, que sob irradiância natural a 37°C a ordem de resistência das principais bactérias entéricas é *Salmonella typhimurium* > *Escherichia coli*> *Shigella flexneri* > *Vibrio cholerae*, sendo *Vibrio cholerae* o microrganismo mais sensível (Berney,2006). Esta gradação explica não só a inativação observada nas amostras de Mutauanha mas também a inativação esperada para os patógenos pesquisados (mesmo que não detectados inicialmente). McGuigan et.al, na sua revisão clássica, confirmam reduções típicas de 4 a 6 log para *E. coli* em garrafas PET expostas durante 6 horas em condições tropicais (McGuigan,2012).

Os mecanismos celulares subjacentes à inativação observada estão hoje bem estabelecidos. A radiação UV-B induz danos directos ao DNA (formação de dímeros de timina, fotoprodutos 6-4) que bloqueiam a replicação celular (McGuigan,2012; Castro,2016;Berney,2006). Em paralelo, a UV-A penetra eficazmente nas garrafas PET e activa cromóforos endógenos (flavinas, quinonas, citocromos), promovendo a transferência de electrões para o oxigénio molecular e a geração intracelular de ROS, superóxido, peróxido de hidrogénio, radical hidroxilo e oxigénio singlete (Castro,2016&Bosshard,2010).Estas espécies oxidam lípidos de membrana, proteínas estruturais e enzimas antioxidantes, em particular catalase e superóxido dismutase, o que amplifica o stress oxidativo num ciclo positivo de dano (Castro,2016). Bosshard et.al, demonstraram, em 2010, que o stress oxidativo induzido pela UV-A promove agregação de proteínas carboniladas e indução de marcadores de senescência celular acelerada em *Escherichia coli*, fenómeno hoje considerado parte central do mecanismo de morte celular por SODIS, (Bosshard,2010).

Os resultados do presente estudo aproximam-se dos obtidos por Cavallini et.al, em comunidades rurais no sul do Tocantins (Brasil), que reportaram inativação completa de *Escherichia coli* após quatro horas de exposição solar e de coliformes

totais após seis horas, em água de poços (Cavallini,2018). Em Gombe (Nigéria), Umar&Muhammad documentaram melhoria significativa da qualidade microbiológica da água após SODIS, com reduções relevantes nos indicadores de contaminação fecal (Umar,2023). Estudo conduzido em comunidades rurais e periurbanas, Phiri, Bavumiragira e Yin demonstraram que o SODIS pode reduzir significativamente o consumo de água com contaminação detectável e a incidência de diarreia em crianças, validando o método como intervenção de saúde pública de baixo custo (Phiri,2023). Estes resultados convergem com os obtidos em Mutauanha e confirmam a transferibilidade do método para o contexto periurbano do norte de Moçambique.

Comportamento da Amostra "B" e fenómeno de morte no escuro

A Amostra "B" apresentou um padrão particularmente informativo do ponto de vista científico. Imediatamente após a exposição solar foram ainda detectadas 3 UFC de *Escherichia coli* (redução de 75% relativamente ao valor basal de 12 UFC), mas, após 72 horas de armazenamento em condições controladas de laboratório e no escuro, todas as colónias deixaram de ser detectáveis. Este padrão configura o fenómeno descrito na literatura como morte no escuro (dark death ou post-irradiation mortality), no qual microrganismos expostos a doses sub-letais de radiação solar perdem viabilidade ao longo de horas a dias subsequentes, mesmo na ausência de iluminação adicional (Castro,2016;Berney,2006;Giannakis,2015).

Os mecanismos propostos para a morte no escuro são múltiplos e convergentes. Em primeiro lugar, a acumulação intracelular de H_2O_2 residual e de iões ferro livres mantém a reactividade de Fenton diferida, gerando radicais hidroxilo no compartimento citoplasmático mesmo após o término da exposição (Castro,2016& Giannakis,2015). Em segundo lugar, a falência progressiva dos sistemas de reparação celular e dos mecanismos antioxidantes, cuja capacidade já foi parcialmente exaurida durante a exposição, impede a recuperação das lesões oxidativas acumuladas (Castro,2016& Bosshard,2010). Em terceiro lugar, a perda persistente de potencial de membrana e a inibição da síntese de ATP comprometem a sobrevivência celular a médio prazo (Ubomba,2010&Berney,2006). Giannakis et.al, caracterizaram detalhadamente este fenómeno em ensaios cinéticos com

Escherichia coli em águas residuais sintéticas, demonstrando que a perda de culturabilidade pode continuar durante 48 horas após o fim da exposição, com taxas variáveis em função da temperatura, da composição da matriz e da concentração de espécies pró-oxidantes (Giannakis,2015).

A interpretação operacional do resultado da Amostra "B" em Mutauanha é clara: a inativação imediata visível (T6h) subestima a eficácia total do SODIS quando a água é subsequentemente armazenada de forma adequada. Em condições reais de uso doméstico, em que a água tratada é tipicamente armazenada por períodos de horas a dias antes do consumo, este fenómeno representa uma margem adicional de segurança microbiológica. Inversamente, este mesmo resultado realça a importância de respeitar o tempo recomendado de exposição (mínimo 6 horas em dias soalheiros, 8 horas em dias parcialmente nublados, 2 dias consecutivos em dias muito nublados), de modo a garantir que mesmo amostras com carga inicial mais elevada ou com características que retardem a inativação imediata atinjam, na soma do dark death, a inativação completa (McGuigan2012;García,2021;Luzi,2016).

É igualmente relevante reconhecer que a ausência de crescimento detectável após 72 horas não exclui em absoluto a existência de células no estado VBNC. A literatura sobre actividade metabólica residual sem capacidade de formar colónias em meios de cultura padrão, podendo eventualmente reactivar-se em condições favoráveis (Castro,2016;Berney,2006;Giannakis,2015). A utilização de marcadores moleculares (PCR, citometria de fluxo, corantes vitais) seria desejável em estudos futuros para caracterizar com maior precisão esta fracção celular não culturável, conforme discutido na secção de limitações.

Estabilidade da qualidade microbiológica pós-tratamento (T+72h)

A estabilidade microbiológica observada após 72 horas de armazenamento à temperatura ambiente, no escuro, em condições controladas de laboratório, constitui um indicador adicional importante da segurança do método SODIS aplicado nas amostras de Mutauanha. Ao contrário de processos químicos como a cloração, o SODIS não confere efeito residual à água tratada, condição que poderia, em princípio, favorecer o recrescimento bacteriano em casos de contaminação posterior

ou de reactivação celular (McGuigan,2012&García2021).

Nas três amostras avaliadas não se observou recrescimento bacteriano detectável após 72 horas, o que sugere que a dose UV efectivamente recebida foi suficiente para causar danos irreparáveis ao material genético e aos sistemas metabólicos das células presentes, em conformidade com os mecanismos descritos por (Ubomba,2010&Berney,2006). Este achado é importante no contexto domiciliar, no qual a água tratada é frequentemente armazenada por períodos prolongados antes do consumo, criando uma janela de risco para recrescimento se o tratamento for insuficiente.

Cavallini et.al, reportaram resultado análogo no sul do Tocantins, com ausência de recrescimento até 66 horas após tratamento de água de poço, e atribuíram esta estabilidade à conjugação entre dose UV adequada e armazenamento em recipientes opacos ou ambiente sem luz (Cavallini,2018). Em revisão sistemática recente, Chaúque et.al, destacaram que a probabilidade de recrescimento bacteriano após SODIS é fortemente dependente da matriz da água, da temperatura de armazenamento e da carga microbiana inicial, sendo geralmente baixa em amostras de baixa turbidez e em condições controladas (Chaúque,2023).

A não detecção de *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* e *Shigella spp.* ao longo dos três momentos temporais não permite, por si só, afirmar a eficácia específica do SODIS sobre estes patógenos no presente estudo, uma vez que nunca foram detectados em qualquer amostra. A literatura científica fornece evidência convergente de que estes microrganismos são inactivados pelo SODIS de forma equivalente ou superior à observada para *Escherichia coli*, sendo *Vibrio cholerae* particularmente sensível (McGuigan,2012&Berney,2006). Em contexto epidemiológico de risco de cólera, como é o caso da província de Nampula desde 2022, a aplicação sistemática do SODIS em poços comunitários teria, portanto, potencial relevante para reduzir a transmissão hídrica do agente etiológico.

6.0 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o método SODIS constitui uma solução eficaz, sustentável e de baixo custo para a melhoria da qualidade da água destinada ao

consumo humano no bairro de Mutauanha. A exposição da água à radiação solar durante seis horas em garrafas PET permitiu reduzir a turbidez e eliminar os indicadores de contaminação fecal, nomeadamente *Escherichia coli* coliformes totais, sem ocorrência de recrescimento bacteriano após o armazenamento.

Os parâmetros físico-químicos mantiveram-se globalmente dentro dos limites recomendados, enquanto os resultados microbiológicos evidenciaram eficácia do tratamento. Após a aplicação do método, as amostras analisadas passaram a cumprir os requisitos microbiológicos estabelecidos pelo Diploma Ministerial n.º 180/2004 para água destinada ao consumo humano.

O SODIS é uma tecnologia apropriada para comunidades que dependem de fontes de água vulneráveis à contaminação, constituindo uma importante medida de saúde pública para a redução das doenças de origem hídrica e para a promoção do acesso à água segura.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI M, Nelson AR, Lopez AL, Sack DA,(2015).Updated global burden of cholera in endemic countries. PLoSNeglTropDis.9(6):e0003832.
- AMERICAN Public Health Association (APHA-2023), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). Standard methods for the examination of water and wastewater.24th ed.Washington,DC:APHA Press.
- AMATOBI DA, Agunwamba JC,(2022). Design, construction and testing of an improved solar water disinfection system (SODIS). Appl Water Sci.12(11):270
- BAIN R, Cronk R, Hossain R, Bonjour S, Onda K, Wright J,(2014). Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review. Trop Med Int Health.19(8):917-27.
- BERNEY M, Weilenmann HU, Egli T,(2006). Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS). Microbiology. 152(6):1719-29.
- BERNEY M, Weilenmann HU, Simonetti A, Egli T,(2006). Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella Typhimurium* and *Vibrio cholerae*. J ApplMicrobiol.101(4):828-36.
- BITEW BD, Gete YK, Biks GA, Adafrie TT. Barriers and enabling factors associated with the implementation of household solar water disinfection: a qualitative study in Northwest Ethiopia. Am J Trop Med Hyg. 2020. 102(2):458-467.

- BOYCE JM, Pittet D,(2002). Guideline for hand hygiene in health-care settings. MMWR Recomm Rep.51(RR-16):1-45.
- BOSSHARD F, Riedel K, Schneider T, Geiser C, Bucheli M, Egli T,(2010). Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated Escherichia coli cells as signs of accelerated cellular senescence. Environ Microbiol.12(11):2931-45.
- BROCKLISS S, Luwe K, Ferrero G, Morse T,(2022). Assessment of the 20 L SODIS bucket household water treatment technology under field conditions in rural Malawi. Int J Hyg Environ Health.240:113913.
- CABRAL JPS. Water microbiology,(2010).Bacterial pathogens and water.Int J Environ Res Public Health.7(10):3657-3703.
- CASTRO-Alfárez M, Polo-López MI, Fernández-Ibáñez P,(2016). Intracellular mechanisms of solar water disinfection. Sci Rep. 2016. 6:38145.
- CISSE G,(2019). Food-borne and water-borne diseases under climate change in low and middle income countries: further efforts needed for reducing environmental health exposure risks. Acta Trop.194:181-188.
- CHAUQUE BJM, Issufo M, Benitez GB, Cossa VC, Chaúque LGH, Stauber CE, (2023). Why do low-cost point-of-use water treatment technologies succeed or fail in combating waterborne diseases in the field? A systematic review.J Environ Chem Eng.11(5):110575.
- CHUQUE BJM, Rott MB,(2021).Solar disinfection (SODIS) technologies as alternative for large-scale public drinking water supply: advances and challenges. Chemosphere. 281:130754.
- CHAUQUE BJM, Issufo M, Guedes VHZ, Benetti AD, Rott MB,(2022). Efficacy of solar disinfection (SODIS) in inactivating viral pathogens in water, with emphasis on SARS-CoV-2: review. Mozambican J Appl Sci1(1):1-18.
- CHIDYA RCG, Munthali AK, Chitedze I, Chitawo MJ, Kapichira AL,(2021).Design and efficacy of solar disinfection system for improved rural household water treatment. J Sustain Dev Energy Water Environ Syst.9(4):1080369.
- CAVALLINI GS, Araujo DLB, Lima JGF,(2018). Desinfecção de água de poço por radiação solar (SODIS): um estudo na região sul do Tocantins.Rev Desafios. 5(Esp):66-73.
- CONROY RM, Elmore-Meegan M, Joyce T, McGuigan KG, Barnes J,(1996). Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. Lancet.348(9043):1695-7.
- COUNCIL for International Organizations of Medical Sciences (CIOMS-2016). International ethical guidelines for health-related research involving humans. 4th ed. Geneva.

- CRUMP JA, Sjölund-Karlsson M, Gordon MA, Parry CM,(2015).Epidemiology, clinical presentation, laboratory diagnosis, antimicrobial resistance, and antimicrobial management of invasive Salmonella infections.Clin Microbiol Rev.28(4):901-37.
- DOMMAN D, Quilici ML, Dorman MJ, Njamkepo E, Mutreja A, Mather AE,(2017). Integrated view of Vibrio cholerae in the Americas.Science.358(6364):789-93.
- DEJUNG S, Fuentes I, Almanza G, Jarro R, Navarro L, Arias G,(2007). Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions. J Water Supply Res Technol Aqua.56(4):245-56.
- DRASAR BS, Forrest BD,(1996). Cholera and the ecology of Vibrio cholerae.London:Chapman & Hall.355 p.
- DRZEWJECKA D,(2016).Significance and roles of Proteus spp. bacteria in natural environments. Microb Ecol.72(4):741-58.
- DIEZ PO, Giannakis S, Rodríguez-Chueca J, Marugán J, Pulgarín C,(2020). Enhancing solar disinfection (SODIS) with the photo-Fenton or the Fe²⁺/peroxymonosulfate-activation process in large-scale plastic bottles leads to toxicologically safe drinking water.Water Res.186:116387.
- EDBERG SC, Rice EW, Karlin RJ, Allen MJ,(2000).Escherichia coli: the best biological drinking water indicator for public health protection.J Appl Microbiol.88(S1):106S-116S.
- EAWAG/Sandec,(2002). SODIS Reference Centre:solar water disinfection, a guide for the application of SODIS.Dübendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- FISHER MB, Iriarte M, Nelson KL,(2012).Solar water disinfection (SODIS) of Escherichia coli, Enterococcus spp., and MS2 coliphage: effects of additives and alternative container materials. WaterRes.46(6):1745-54.
- GARCIA-Gil Á, García-Muñoz RA, Marugán J,(2022).Solar water disinfection in large-volume containers: a case study in Tigray, Ethiopia.SciRep.
- GARCIA-Gil Á, García-Muñoz RA, McGuigan KG, Marugán J,(2021).Solar water disinfection to produce safe drinking water: a review of parameters, enhancements, and modelling approaches to make SODIS faster and safer. Molecules. 26(11):3431.
- GARCIA-Gil Á, Feng L, Moreno-SanSegundo J, Giannakis S, Pulgarín C, Marugán J,(2022). Mechanistic modelling of solar disinfection (SODIS) kinetics of Escherichia coli, enhanced with H₂O₂,Part 1:The dark side of peroxide.Chem Eng J. 439:135709.
- GIANNAKIS S, Darakas E, Escalas-Cañellas A, Pulgarin C,(2015). Solar disinfection modeling and post-irradiation response of Escherichia coli in wastewater. Chem Eng J.281:588-98.

- GRAHAM JP, Polizzotto ML,(2013). Pit latrines and their impacts on groundwater quality:a systematic review. *Environ Health Perspect.*121(5):521-30.
- GLEESON T, Wada Y, Bierkens MFP, van Beek LPH,(2012).Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature.*488(7410):197-200.
- GBD 2021 Diarrhoeal Diseases Collaborators. Global, regional, and national age-sex-specific burden of diarrhoeal diseases, their risk factors, and aetiologies, 1990-2021, for 204 countries and territories: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021.*Lancet Infect Dis.*2025.25(5):519-536.
- HEASELGRAVE W, Kilvington S,(2011).The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against *Ascaris*, *Giardia*, *Acanthamoeba*, *Naegleria*, *Entamoeba* and *Cryptosporidium*. *Acta Trop.* 119(2-3):138-43.
- HOWARD G, Bartram J,(2003).Domestic water quantity, service level and health. Geneva:WHO/SDE/WSH/03.02.
- HULLEY SB, Cummings SR, Browner WS, Grady DG, Newman TB,(2013). *Designing clinical research.* 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- ISO-International Organization for Standardization (ISO-2006). ISO19458:2006. Water quality, sampling for microbiological analysis. Geneva.
- ISO-International Organization for Standardization (ISO-2018).ISO5667-3:2018. Water quality, sampling, part 3: preservation and handling of water samples. Geneva.
- ISO-International Organization for Standardization (ISO-2014).ISO 9308-1:2014. Water quality, enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria, part 1:membrane filtration method. Geneva.
- ISLAM MA, Azad AK, Akber MA, Rahman M, Sadhu I,(2015). Effectiveness of solar disinfection (SODIS) in rural coastal Bangladesh. *J Water Health.*13(4):1113-22.
- INE-Instituto Nacional de Estatística de Moçambique,(2021). Inquérito sobre o Orçamento Familiar IOF 2019/20: relatório final. Maputo: INE.
- SOBSEY MD, Stauber CE, Casanova LM, Brown JM, Elliott MA,(2008). Point of use household drinking water filtration: a practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world. *Environ Sci Technol.*42(12):4261-7.
- KOTLOFF KL, Riddle MS, Platts-Mills JA, Pavlinac P, Zaidi AKM,(2018).Shigellosis. *Lancet.*391(10122):801-12.
- KEHOE SC, Joyce TM, Ibrahim P, Gillespie JB, Shahar RA, McGuigan KG.(2001). Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors.*Water Res.* 35(4):1061-5.

- LAWRIE K, Mills A, Figueredo-Fernández M, Gutiérrez-Alfaro S, Manzano M, Saladin M,(2015). UV dosimetry for solar water disinfection (SODIS) carried out in different plastic bottles and bags. *Sens Actuators B Chem.*208:608-15.
- LUGO-Arias J, Burgos-Vergara J, Lugo-Arias E, Gould A, Ovallos-Gazabon D,(2020).Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon.*6(2):e03062
- LUZI S, Tobler M, Suter F, Meierhofer R,(2016).SODIS manual: guidance on solar water disinfection. Dübendorf: Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- MAUSEZAHN D, Christen A, Pacheco GD, Tellez FA, Iriarte M, Zapata ME,(2009). Solar drinking water disinfection (SODIS) to reduce childhood diarrhoea in rural Bolivia:a cluster-randomized, controlled trial. *PLoS Med.* 2009. 6(8):e1000125. doi:10.1371/journal.pmed.1000125.
- MAURE G, Pinto I, Ndebele-Murisa M, Muthige M, Lennard C, Nikulin G,(2018). The Southern African climate under 1.5°C and 2°C of global warming as simulated by CORDEX regional climate models. *Environ Res Lett.* 13(6):065002.
- MAGALHAES JHF, Bezerra LN, Santos AT, Lima KJV, Sousa GR, Vasconcelos RM,(2022). Aqualuz: a new solar disinfection device for treatment of cistern water. *AQUA Water InfrastructEcosyst Soc.*71(6):682-696.
- MARCHELLO CS, Carr SD, Crump JA,(2020).A systematic review on antimicrobial resistance among *Salmonella Typhi* worldwide. *Am J Trop Med Hyg.*103(6):2518-27.
- MARTINEZ-Pérez G, Muela Ribera J, Hausmann-Muela S, Kessy J, Mfaume R, Pell C,(2020).The meanings of water:socio-cultural perceptions of solar disinfected (SODIS) drinking water in Bolivia and implications for its uptake.*Water.*12(2):442.
- MAROBHE NJ, Sabai SM,(2021).Treatment of drinking water for rural households using Moringa seed and solar disinfection.*J Water Sanit Hyg Dev.*11(4):579-590.
- MAROCO J,(2021).Análise estatística com o SPSS Statistics.8.^a ed.Pêro Pinheiro: ReportNumber.
- MCGUIGAN KG, Conroy RM, Mosler HJ, du Preez M, Ubomba-Jaswa E, Fernández-Ibáñez P,(2012). Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *J Hazard Mater.* 2012. 235-236:29-46.
- MISAU,(2024).Ministério da Saúde de Moçambique.Anuário Estatístico de Saúde.Maputo.
- MORENO-San Segundo J, Giannakis S, Samoilis S, Farinelli G, McGuigan KG,

- Pulgarín C,(2021).SODIS potential: a novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide. ChemEng J.2021. 419:129889.
- NWANKWO EJ, Ekwueme BN,(2024). Modeling Escherichia coli inactivation during solar disinfection: effects of UV intensity, water temperature, and turbidity.Sol Energy.
- NAIR SS, Marasini R, Buck L,(2023).Life cycle assessment comparison of point-of-use water treatment technologies: solar water disinfection (SODIS), boiling water, and chlorination. J Environ Chem Eng.11(3):110015.
- O'DOWD K, Martínez-García A, Oller I, Polo-López MI, Couso-Pérez S, Ares-Mazás E,(2023).Efficient solar disinfection (SODIS) using polypropylene based transparent jerrycans. J Environ Chem Eng.11(3):109787.
- PARSA SM, Momeni S, Hemmat A, Afrand M,(2021). Effectiveness of solar water disinfection in the era of COVID-19 pandemic for contaminated water/ wastewater treatment considering UV effect and temperature.J Water Process Eng.43:102224.
- PERREIRA LA, Vieira PF, Brito LTL, Gava CAT,(2014). Avaliação de tratamento simplificado da água de cisterna: desinfecção solar (SODIS) para consumo humano. Anais do 9.º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. Petrolina (PE): Embrapa Semiárido.
- POLIT DF, Beck CT,(2021). Nursing research: generating and assessing evidence for nursing practice. 11th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- PHIRI DB, Bavumiragira JP, Yin H,(2023). Efficacy of solar water disinfection treatment system in improving rural and peri-urban household drinking water quality and reducing waterborne diarrhoeal diseases. AQUA Water Infrastruct Ecosyst Soc. 72(7):1288-1308.
- PRUSS-Ustün A, Wolf J, Bartram J, Clasen T, Cumming O, Freeman MC,(2019). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: an updated analysis with a focus on low and middle income countries. Int J Hyg Environ Health. 222(5):765-77.
- RAMIREZ-Castillo FY, Loera-Muro A, Jacques M, Garneau P, Avelar-González FJ, Harel J,(2015).Waterborne pathogens: detection methods and challenges. Pathogens.4(2):307-34.
- REBELO MSC,(2024).Mozambique public investment in the water and sanitation sector and the targets of SDG 6. UCL Open Environ.6:189.v1.
- PRONASAR ,(2019).República de Moçambique.Programa Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento Rural 2019-2030. Maputo: Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos (DNAAS).

REPÚBLICA de Moçambique,(2021). Resolução que aprova a Estratégia Nacional de Saneamento Rural 2021-2030. Boletim da República, I Série, n.º 213, de 4 de Novembro de 2021. Maputo: Imprensa Nacional de Moçambique.

REPÚBLICA de Moçambique,(2004). Ministério da Saúde. Diploma Ministerial n.º 180/2004, de 15 de Setembro. Regulamento sobre a Qualidade da Água para o Consumo Humano. Boletim da República, I Série, n.º 37. Maputo: Imprensa Nacional de Moçambique.

SANGARE D, Brou AL, Sou/Dakouré M, Sossou SK, Hijikata N, Yacouba H,(2021). Urine treatment by solar disinfection for agriculture reuse purpose: case of Burkina Faso. J Water Sanit Hyg Dev.11(1):1-9.

SAMOILI S, Farinelli G, Moreno-SanSegundo JÁ, McGuigan KG, Marugán J, Pulgarín C,(2022). Predicting the bactericidal efficacy of solar disinfection (SODIS): from kinetic modeling of in vitro tests towards the in silico forecast of E. coli inactivation. Chem Eng J. 427:130866.

SOMMER B, Marino A, Solarte Y, Salas ML, Dierolf C, Valiente C,(1997). SODIS: an emerging water treatment process. J Water Supply Res Technol Aqua.46(3):127-37.

Siamalube B,(2025). Ehinmitan E. Vibrio cholerae: understanding a persistent pathogen in Sub-Saharan Africa and the East Mediterranean Region. Pathog Dis. 83:ftaf004.

Sorensen JPR, Lapworth DJ, Nkhuwa DCW, Stuart ME, Gooddy DC, Bell RA,(2015). Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. Water Res.72:51-63.

Tamas A, Mosler HJ,(2011). Why do people stop treating contaminated drinking water with solar water disinfection (SODIS)?. Health Educ Behav.38(4):357-66.

UN (2024). United Nations Children's Fund (UN/UNICEF) Mozambique. Cholera Update, January 2024. Maputo: UNICEF Mozambique.

UBOMBA-Jaswa E, Fernández-Ibáñez P, Navntoft C, Polo-López MI, McGuigan KG,(2010). Investigating the microbial inactivation efficiency of a 25 L batch solar disinfection (SODIS) reactor enhanced with a compound parabolic collector (CPC) for household use. J Chem Technol Biotechnol.85(8):1028-37.

UBOMBA-Jaswa E, Navntoft C, Polo-López MI, Fernández-Ibáñez P, McGuigan KG,(2009). Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. Photochem Photobiol Sci.8(5):587-95.

UMAR AM, Muhammad K,(2023). Households water purification using solar water disinfection (SODIS) in Gombe metropolis, Gombe state, Nigeria. Bioscience and Scientific Technology Review (BSTR). 11(1):5-9.

UN,(2015). United Nations Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable

Development. New York: United Nations. A/RES/70/1.

VIVAR M, Fuentes M, Torres J, Rodrigo MJ,(2021).Solar disinfection as a direct tertiary treatment of a wastewater plant using a photochemical-photovoltaic hybrid system. J Water Process Eng.42:102196.

WAMYIL JF, Ogbuagu CN, Oyebadejo SA, Nabona J, Ntulumbe I, Wamyil FB,(2023). Microbiological quality of water samples obtained from water sources in Ishaka, Uganda. SAGE Open Med.11:20503121231194239.

WATER Aid,(2023).Estratégia Nacional Water Aid Moçambique 2023-2028. Maputo:WaterAid Moçambique.

WEGELIN M, Canonica S, Mechsner K, Fleischmann T, Pesaro F, Metzler A,(1994). Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. J Water Supply Res Technol Aqua.43(3):154-69.

WOLF J, Johnston RB, Ambelu A, Arnold BF, Bain R, Brauer M,(2023). Burden of disease attributable to unsafe drinking water, sanitation, and hygiene in domestic settings: a global analysis for selected adverse health outcomes.Lancet. 401(10393):2060-71.doi:10.1016/S0140-6736(23)00458-0.

WHO/UNICEF (2025).Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP). Progress on household drinking water, sanitation and Hygiene 2000-2024: special focus on inequalities. New York: UNICEF; Geneva: WHO.

WHO/UNICEF,(2023)Joint Monitoring Programme (JMP). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender. New York: UNICEF; Geneva: WHO.

WORLD Health Organization,(2024).Diarrhoeal disease: fact sheet. Geneva: WHO.

WORLD Bank,(2024).People using safely managed drinking water services (% of population), Mozambique. Washington, DC: World Bank Open Data.

WORLD Health Organization,(2024). Drinking-water: fact sheet. Geneva: WHO.

WORLD Health Organization Regional Office for Africa,(2024). Monthly Regional Cholera Bulletin. Brazzaville: WHO AFRO.

WORLD Health Organization,(2022).Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO. p.614.

WORLD Health Organization,(2019). Results of round II of the WHO international scheme to evaluate household water treatment technologies. Geneva: WHO. ISBN 978-92-4-151603-7.