

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CONCEPÇÃO DE BIOFILTRO
PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO
HUMANO EM ÁREAS RURAIS BRASILEIRAS**

CRISTIANE FRIZZO DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: YOVANKA PÉREZ GINORIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

BRASÍLIA/DF
ABRIL DE 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CONCEPÇÃO DE BIOFILTRO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO
HUMANO EM ÁREAS RURAIS BRASILEIRAS

CRISTIANE FRIZZO DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS.

APROVADA POR:

PROFa. YOVANKA PEREZ GINORIS, DSc (UnB)
(ORIENTADORA)

PROFa. CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO, PhD (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)

PROFa. SONALY CRISTINA REZENDE BORGES DE LIMA, DSc (UFMG)
(EXAMINADORA EXTERNA)

BRASÍLIA/DF, 28 DE ABRIL DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, CRISTIANE FRIZZO

Concepção de biofiltro para tratamento de água para consumo humano em áreas rurais brasileiras.

[Distrito Federal] 2023, 109 p., 210 x 297 mm.

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

1. Tratamento de água domiciliar 2. Saneamento rural

3. Filtração lenta domiciliar 4. Biofiltro

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, C.F. (2023). Concepção de biofiltro para tratamento de água para consumo humano em áreas rurais brasileiras. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 109 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Cristiane Frizzo de Oliveira

TÍTULO: Concepção de biofiltro para tratamento de água para consumo humano em áreas rurais brasileiras

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Cristiane Frizzo de Oliveira

cristiane_frizzo@yahoo.com.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela oportunidade gratificante de ter chegado até aqui e de estar finalizando essa etapa dolorida e ao mesmo tempo engrandecedora da minha vida. Aos meus pais, agradeço imensamente pela minha vida e pelo apoio e amor incondicional que sempre me dispensaram, mesmo quando discordantes das minhas decisões. A minha irmã, Fernanda, pelo carinho e atenção sempre presentes, quando preciso. Ao Felipe, meu companheiro de caminhada, agradeço o incentivo e as palavras amorosas e firmes, quando as forças me faltavam. Ao meu filho querido, Manuel, minha motivação, minha razão de ser e de persistir, agradeço por ter chegado na minha vida justamente nessa fase e ter movimentado todo o meu universo.

A Professora Yovanka, agradeço a presença constante, em cada passo e mudança de rota. Agradeço o carinho e a dedicação, todas as sugestões e recomendações, que me fizeram crescer e enxergar cada vez mais longe. Agradeço também a Professora Cristina, pela coorientação no início da minha jornada e pelos saberes recebidos.

Agradeço também a cada professor do PTARH, pelas contribuições dentro e fora de sala de aula. Agradeço imensamente ao CNPq, pelo apoio financeiro, que possibilitou minha continuidade no programa e que foi um alento nos momentos difíceis da pandemia. Agradeço a cada colega e amigo que fiz nessa jornada de quase quatro anos de mestrado.

Por fim, meu muito obrigada a cada um que fez parte dessa minha caminhada e que, direta ou indiretamente, esteve presente nos momentos alegres e nos difíceis também.

Me sinto honrada e imensamente grata por ter chegado até aqui. Que cada pessoa citada receba todo o meu amor e carinho e que eu possa de alguma forma retribuir para o universo essa conquista e que este trabalho possa, de fato, encontrar sua aplicação no mundo real, abrindo portas para o acesso à água de qualidade para aqueles ainda desprivilegiados.

RESUMO

No Brasil, mais de 70% das pessoas residentes em áreas rurais possuem pouco ou nenhum acesso à água de qualidade. Nesse contexto, o filtro lento de areia para uso domiciliar, ou simplesmente biofiltro, mostra-se como uma alternativa apropriada para o tratamento da água para consumo humano, uma vez que apresenta custos relativamente baixos e simplicidade operacional, podendo ser confeccionado e operado com materiais locais pelos próprios usuários do sistema. O objetivo do presente trabalho consiste em projetar um biofiltro focado na realidade rural, levando em conta a facilidade de confecção e de operação e os custos associados à produção do filtro, além de divulgar os resultados gerados em forma de cartilha e planilha eletrônica, de modo a viabilizar e ampliar o acesso a essas informações. Como resultado, o biofiltro proposto, ideal para uso em residências com até seis pessoas, se mostrou uma opção acessível financeiramente, com custo inicial de R\$180,15 para ser confeccionado, valor que pode ser ainda menor com a reutilização de recipientes que porventura estejam disponíveis localmente. Considerando que já foi demonstrado pela literatura ser tecnicamente possível a construção de biofiltros pelas próprias comunidades, sob supervisão de profissional técnico, pode-se concluir que essa é uma alternativa viável para possibilitar o acesso à água de qualidade por famílias em áreas rurais. Além disso, espera-se que esses resultados, somados à disponibilização gratuita e ampla das informações em forma de cartilha e planilha eletrônica, impulsionem iniciativas públicas para o investimento nesse tipo de tecnologia, em busca da universalização do acesso à água de qualidade.

Palavras-chave: biofiltro; filtro lento de areia; tratamento de água; saneamento rural.

ABSTRACT

In Brazil, more than 70% of the rural population have little or no access to safe water. In this context, the household slow sand filter, or simply biofilter, is presented as an appropriate alternative for water treatment for drinking purposes, since it presents relatively low cost and operational simplicity, and it can be built and operated with local material by the users themselves. The goal of the present work is to propose the project for a biofilter designed with adequate features to be implemented and used by families living in Brazilian rural areas, considering the easiness of construction and operation and the costs related to the production of the filter. Besides, this work is extended into a booklet and a spreadsheet, intended to spread this knowledge, making it accessible to the whole community. As a result, the proposed biofilter for a household of up to six people presented itself as an affordable option, with an initial cost of R\$180,15, which can be even lower if containers available locally can be reused in the implementation of the system. Considering that it has been demonstrated by the literature to be technically feasible the construction and operation of biofilters by the local community itself, under technical supervision, it can be concluded that this is a viable alternative to enable the access to safe water in rural areas. Moreover, it is expected that these results, combined with the free and wide propagation of these information in the booklet and the spreadsheet, can push public initiatives into investing in this kind of technology, going forward towards the universalizing the access to safe water.

Keywords: biofilter; slow sand filtration; water treatment; rural sanitation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. ASPECTOS GERAIS DA FILTRAÇÃO LENTA.....	8
3.2. PARÂMETROS DE PROJETO DE FILTROS LENTOS DE AREIA.....	16
3.2.1. Altura da coluna de água.....	16
3.2.2. Taxa de filtração.....	17
3.2.3. Meio filtrante.....	21
3.2.4. Regime de operação.....	26
3.3. FILTRAÇÃO LENTA DOMICILIAR.....	32
3.4. TRATAMENTO MULTI-BARREIRA.....	44
3.5. MANTAS SINTÉTICAS NA FILTRAÇÃO LENTA.....	50
4. METODOLOGIA.....	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5.1. CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO BIOFILTRO.....	66
5.2. ORÇAMENTO DO BIOFILTRO PROPOSTO.....	77
5.3. PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DO BIOFILTRO.....	78
5.3.1. Obtenção de areia e pedregulho.....	82
5.3.2. Instalação do biofiltro.....	87
5.3.3. Operação do biofiltro.....	91
5.3.4. Limpeza e manutenção.....	96
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
ANEXO 1: Orçamentos dos materiais para o biofiltro proposto.....	110
ANEXO 2: Cartilha: biofiltro para uso domiciliar em áreas rurais brasileiras.....	116
ANEXO 3: Memorial de cálculo.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Eficiência da filtração lenta e níveis de remoção de parâmetros de qualidade da água reportados na literatura.....	12
Tabela 3.2: Qualidade mínima da água bruta para alimentar o filtro lento de areia.....	13
Tabela 3.3: Resumo dos parâmetros de projeto usualmente adotados na filtração lenta	31
Tabela 3.4: Eficiência do biofiltro desenvolvido por DESEA Peru (2017).....	39
Tabela 3.5: Propriedades das mantas (adaptado de Di Bernardo e Dantas, 2005)	53
Tabela 3.6: Propriedades das mantas para uso na filtração lenta.....	54
Tabela 3.7: Caracterização das mantas sintéticas utilizadas por Mbvette <i>et al.</i> (1990).	55
Tabela 3.8: Propriedades das mantas naturais usadas por Luxton e Graham (1998)	56
Tabela 3.9: Caracterização da manta utilizada por Santos (2015).....	58
Tabela 3.10: Caracterização da manta utilizada por Sanín (2013)	59
Tabela 3.11: Caracterização da manta utilizada por Almeida (2018).....	60
Tabela 5.1: Parâmetros de projeto adotados para o biofiltro	67
Tabela 5.2: Altura de cada camada no biofiltro recomendada e adotada (cm).....	69
Tabela 5.3: Valores dos parâmetros de projeto do biofiltro	75
Tabela 5.4: Orçamento do biofiltro.....	77
Tabela 5.5: Testes para determinação da adequabilidade de materiais arenosos ao biofiltro	84
Tabela 5.6: Conversão da vazão de seg/L para L/min após o teste da taxa de filtração .	90
Tabela 5.7: Possibilidades de horários para abastecimento do biofiltro	92
Tabela 5.8: Instruções e frequência da limpeza dos componentes do biofiltro	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Matriz tecnológica de soluções coletivas para o abastecimento de água preconizada pelo PNSR (Funasa, 2019).....	5
Figura 3.2: Matriz tecnológica de soluções individuais para o abastecimento de água preconizada pelo PNSR (Funasa, 2019).....	6
Figura 3.3: Esquema de um filtro lento de areia (Adaptado de Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017)9	
Figura 3.4: Vista em corte do biofiltro avaliado por Elliot <i>et al.</i> (2006), medidas em cm	28
Figura 3.5: Unidades filtrantes avaliadas por Terin e Sabogal-Paz (2018), medidas em cm	30
Figura 3.6: Biofiltros implantados na Cambodja (Liang <i>et al.</i> , 2010)	34
Figura 3.7: Filtro lento de areia de concreto para uso domiciliar, por CAWST (2009) .	36
Figura 3.8: Biofiltro em pote de cerâmica estudado por Gucchi <i>et al.</i> , 2014.....	37
Figura 3.9: (a) esquema do biofiltro de DESEA Peru (2017) (medidas em cm); (b) foto do filtro instalado.....	38
Figura 3.10: Esquema genérico do interior do filtro lento ilustrado pela EMATER-MG (Leal, 2016)	40
Figura 3.11: Sistema de filtração lenta em residência de produtor rural adaptada de Leal <i>et al.</i> (2013). Direito de imagem: Rubens Xavier.....	41
Figura 3.12: Esquema do FLA comunitário - Projeto Sanear Amazônia (SESAN/MDS, 2016).....	43
Figura 3.13: Abordagem mutli-barreira para o tratamento com biofiltros	45
Figura 3.14: Detalhe das estruturas dos fios nas (a) mantas não-tecidas e (b) mantas tecidas (ABINT, 2017)	51
Figura 5.1: Exemplos de tanques de água que podem ser reutilizados (Fonte: MercadoLivre, 2023).....	68
Figura 5.2: Alturas adotadas para cada camada do biofiltro (medidas em cm).....	69
Figura 5.3: Exemplos de difusores para biofiltros: (a) bacia plástica perfurada utilizada como difusor por DESEA Peru (2017); (b) difusor feito com plástico ondulado de pastas escolares, por CAWST (2009); e (c) perfuração de placa metálica para uso como difusor, por CAWST (2009).	72
Figura 5.4: Posicionamento e dimensões da tubulação de saída (medidas em cm)	73
Figura 5.5: Detalhamento da tubulação de fundo (medidas em cm).....	74
Figura 5.6: Biofiltro proposto (medidas em cm)	76
Figura 5.7: Diferentes camadas que compõem o solo (Adaptado de EducaCivil, 2020)84	
Figura 5.8: Teste visual da composição da areia	85
Figura 5.9: Teste visual para avaliar se a areia foi lavada adequadamente (tradução livre de CAWST, 2009).....	87
Figura 5.10: Sequência de peneiras para separação do meio filtrante e da camada suporte do biofiltro	88
Figura 5.11: Passos para a instalação do biofiltro	88
Figura 5.12: Etapas do preenchimento com pedregulho e areia (adaptado de CAWST, 2012).....	89
Figura 5.13: Filtro lento de areia domiciliar intermitente de Amui e Moruzi (2016)....	94

1. INTRODUÇÃO

Apesar de o acesso à água segura para o consumo humano e para a higiene pessoal ser requisito mínimo para assegurar saúde, bem-estar e dignidade às pessoas, apenas 71% da população em nível mundial conta com acesso à água tratada de qualidade, o que resulta em mais de 2 bilhões de pessoas “consomem água que não é manipulada de forma segura” (tradução livre, WHO/UNICEF, 2019).

Ademais, a distribuição não é igual em todas as regiões, sendo que apenas 53% da população mundial residente em áreas rurais contam com acesso à água segura, em comparação com 85% em áreas urbanas. Além disso, 80% das pessoas que ainda não têm acesso sequer serviços básicos de saneamento residem em áreas rurais, sendo que 435 milhões de pessoas utilizam fontes de água sem tratamento e 144 milhões ainda consomem água bruta retirada de corpos d'água superficiais (WHO/UNICEF, 2019).

No cenário brasileiro, serviços centralizados de abastecimento de água alcançam 84,2% da população (177 milhões de pessoas), o que, por outro lado, corresponde a mais de 36 milhões de brasileiros sem garantia de acesso à água de qualidade (SNIS, 2021). No âmbito rural, apenas 40,5% da população possui abastecimento de água adequado, o que equivale a um total de mais de 23 milhões de habitantes em áreas rurais com atendimento precário ou sem atendimento, segundo o Programa Nacional de Saneamento Rural – PNSR (Funasa, 2019).

Segundo o Plansab (2019), seriam necessárias dezenas de bilhões de reais em investimentos para implantação e expansão dos sistemas centralizados de tratamento e distribuição de água, visando o cumprimento das metas previstas para 2023 e 2033, rumo à universalização do acesso à água de qualidade. Entretanto, de acordo com o Relatório Luz 2020, produzido pelo Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030 (GTSCA, 2030), considerando-se o contexto atual de “falha do Estado brasileiro na garantia da melhoria progressiva do acesso à água potável”, é possível que o país somente alcance a universalização do atendimento quanto ao saneamento básico e à água potável na década de 2060.

Nota-se, portanto, um contexto de dívida sanitária do Estado Brasileiro para com as populações rurais, apesar dos mandamentos constitucionais e infraconstitucionais e dos compromissos assumidos internacionalmente. Conforme o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), alguns obstáculos se interpõem no suprimento das necessidades de saneamento básico quando se trata de áreas rurais, devido a peculiaridades dessas regiões, como a dispersão e o isolamento geográfico dessas localidades em relação aos centros urbanos; acesso dificultado por via terrestre ou fluvial; insuficiência financeira ou de pessoal por parte dos municípios; ausência de ações que engajem e empoderem essas populações; escassez de políticas públicas de saneamento rural; e dispersão das competências relacionadas ao saneamento básico entre diversos órgãos do governo. Apesar disso, esses desafios não podem isentar o Estado de seus compromissos para com a população (Funasa, 2019).

Nesse contexto, soluções alternativas, de uso descentralizado, vêm sendo apontadas como forma de ampliar o acesso à água de qualidade, como aquelas sugeridas na matriz tecnológica do PNSR, quando presentes fontes de água doce (superficiais, subterrâneas ou pluviais), a saber: filtração em margem, filtração lenta domiciliar e tratamento convencional por batelada seguido por filtração lenta domiciliar, todos com desinfecção como pós-tratamento. Para águas salobras, recomenda-se pré-tratamento e dessalinização solar, seguidos de desinfecção da água (Funasa, 2019).

Destacam-se os filtros lentos de areia, por apresentarem custos iniciais (para confecção e implantação) relativamente baixos, sem a necessidade de reposição de peças, além de vida útil de vários anos, se manejados corretamente. Ademais, apresentam ainda simplicidade operacional e não envolvem adição de produtos químicos no condicionamento da água bruta (ou afluenta ao filtro), de forma que podem ser operados pelos próprios usuários do sistema, desde que treinados previamente (Liang *et al.*, 2010; Bernardes *et al.*, 2018). Por fim, os filtros lentos de areia são eficazes na remoção de impurezas, produzindo água com elevada qualidade microbiológica, o que pode contribuir para a redução da incidência de doenças de veiculação hídrica, como a diarreia, que pode levar até a morte, especialmente em crianças (Sobsey *et al.*, 2008; Liang *et al.*, 2010; Bernardes *et al.*, 2018).

Alguns programas de distribuição de biofiltros para famílias rurais ao redor do mundo vêm sendo desenvolvidos no intuito de possibilitar a essas populações acesso à água de qualidade, tais como o *Center for Affordable Water and Sanitation Technology* – CAWST (2012), organização estadunidense sem fins lucrativos que desenvolveu um biofiltro de concreto para uso em países em desenvolvimento; a Associação DESEA Peru (2017), que vêm instalando biofiltros em escolas e comunidades rurais nas cordilheiras dos Andes desde 2008; e diversas organizações não-governamentais (ONGs) que instalam biofiltros em comunidades rurais na Cambodia, país com o maior número de biofiltros no mundo, conforme reportado por Liang *et al.* (2010).

Todavia, apesar dos estudos promissores acerca da sua empregabilidade em zonas rurais, a filtração lenta ainda é subutilizada no Brasil. Assim, o presente trabalho objetiva facilitar o acesso da população brasileira a essa tecnologia, mediante a confecção de cartilha a respeito da filtração lenta para divulgação da tecnologia e da proposição da concepção de um filtro lento de areia com características próprias para uso domiciliar em áreas rurais brasileiras. Priorizam-se, neste trabalho, os baixos custos de construção e de manutenção, bem como a simplicidade de confecção, com possibilidade de implantação e de operação pelos próprios usuários e a flexibilidade para utilização de materiais alternativos disponíveis localmente.

É sabido que no Brasil, as realidades são muitas e diferentes entre si, de forma que não se pode assumir que uma solução adotada com sucesso em uma comunidade quilombola será aceita da mesma maneira por populações indígenas ou amazônicas, por exemplo. Assim sendo, o presente trabalho visa propor não um projeto fechado e definitivo de um filtro lento de areia, mas, sim, um esboço inicial, que se insere em um contexto maior, no qual se recomenda seja feita, em um primeiro momento, a identificação da comunidade ou família receptora do biofiltro e o estabelecimento de diálogos com os potenciais usuários. Nesse processo, pode ser reconhecida a necessidade de eventuais adaptações do projeto proposto às peculiaridades locais socioculturais, étnicas, históricas, religiosas, ecológicas e outras em que estão inseridas essas populações, além de suas relações interpessoais e com o meio ambiente, dentre outros aspectos que possam ser relevantes para a apropriação da tecnologia e conseqüente continuidade do uso no longo prazo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Conceber biofiltro para tratamento de água para consumo humano em áreas rurais brasileiras, levando em conta a facilidade de confecção e de operação e os custos associados à produção do filtro, além de divulgar os resultados gerados em forma de cartilha e de planilha eletrônica, de modo a viabilizar e ampliar o acesso a essas informações.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a concepção e o dimensionamento de biofiltro para uso domiciliar unifamiliar, priorizando-se os baixos custos e as simplicidades de confecção e operacional;
- Orçar materiais necessários à confecção do biofiltro concebido;
- Propor cartilha, com linguagem simples e acessível, para disseminação de informações acerca da filtração lenta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das mais antigas formas de tratamento de água para consumo humano, a filtração lenta é a tecnologia que, empregada como etapa única, promove a melhor qualidade microbiológica para a água tratada, dentre as tecnologias convencionais de tratamento de água (Huisman e Wood, 1974).

A filtração lenta foi trazida para a América do Sul na década de 1990 (Logsdon, 2008), porém não foi muito difundida no Brasil, apesar de ter tido sua eficiência verificada, em várias pesquisas em escala piloto e através de protótipos. Não obstante, os filtros lentos de areia têm potencial para ser empregados no contexto brasileiro, especialmente nas áreas rurais, onde os sistemas coletivos de abastecimento de água são precários ou inexistentes.

Nesse sentido, a filtração lenta foi considerada, pelo Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), dentre outras, como uma das soluções tecnológicas apropriadas para o tratamento de água para consumo humano em áreas rurais, tanto no âmbito de ações coletivas como individuais, quando presentes mananciais de água doce, subterrâneos ou superficiais, ou ainda águas pluviais no caso de soluções individuais (Figura 3.1/Figura 3.2).

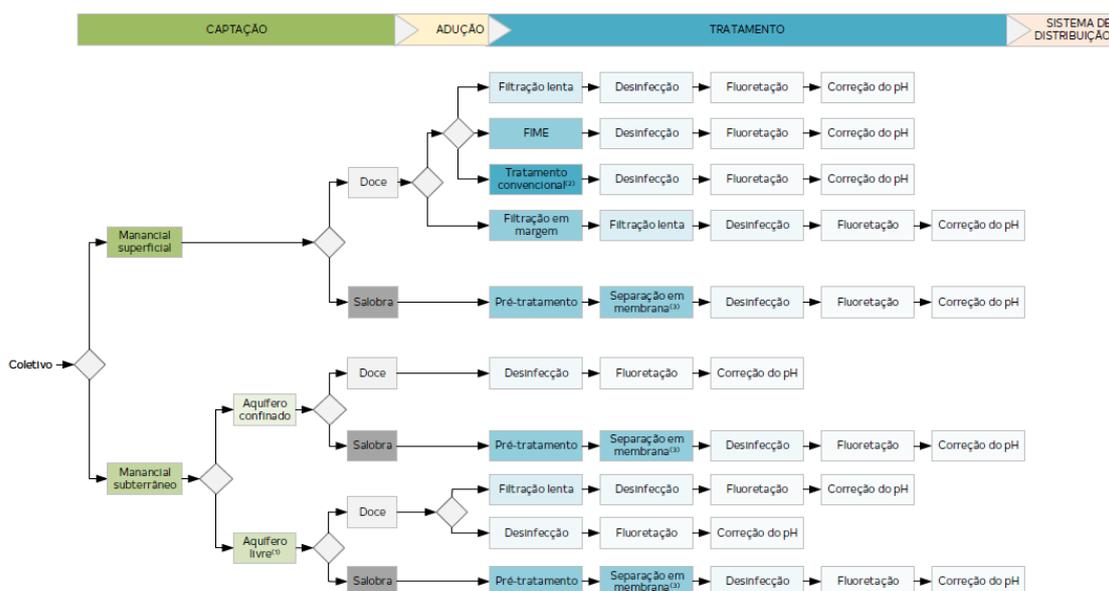


Figura 3.1: Matriz tecnológica de soluções coletivas para o abastecimento de água preconizada pelo PNSR (Funasa, 2019)

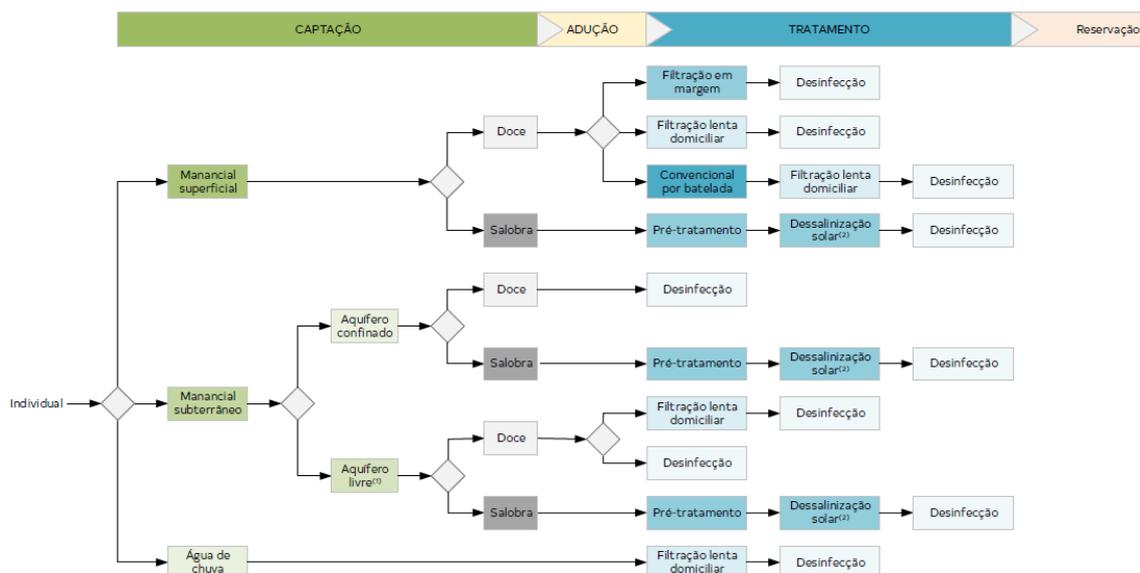


Figura 3.2: Matriz tecnológica de soluções individuais para o abastecimento de água preconizada pelo PNSR (Funasa, 2019)

Ao abordar o meio rural, faz-se necessário delinear o que são consideradas áreas rurais. Este trabalho segue a definição trazida pelo PNSR, que leva em conta a densidade demográfica bem como a contiguidade espacial. Assim, são consideradas áreas rurais: aglomerações localizadas próximas de áreas urbanas (periferias urbanas ou a menos de um quilômetro de distância do urbano); aglomerações mais adensadas isoladas; aglomerações menos adensadas isoladas (aglomerações populacionais distantes umas das outras e de áreas mais adensadas ou dispostas no entorno de um empreendimento rural); e sem aglomerações, com domicílios relativamente próximos de aglomerações ou isolados. No âmbito desta última, a qual apresenta o maior quantitativo populacional (62,8%) dentre as classificações consideradas, soluções domiciliares foram avaliadas, pelo PNSR, como sendo as mais adequadas para atender a esses contingentes populacionais. Assim, alternativas tecnológicas individuais devem predominar nesse contexto, enquanto práticas coletivas podem ser conjecturadas a depender do quadro sanitário identificado (Funasa, 2019).

Para atender a essa demanda por soluções unitárias (ou individuais), os filtros lentos de areia podem ser projetados para operar em escala domiciliar, ocupando áreas menores, sendo possível até mesmo alocá-los dentro da residência. Assim, podem ser operados pelos próprios moradores, que devem abastecer o filtro com água bruta diariamente. Esse

tipo de filtro lento de areia, de menor escala, para uso domiciliar e com operação intermitente é também chamado biofiltro ou filtro biológico. Cabe ressaltar que tais adaptações impostas aos filtros lentos de areia visam justamente à desoneração e à simplificação do sistema, com foco na sua confecção, operação e manutenção pela própria comunidade (Terin e Sabogal-Paz, 2018).

Alguns estudos já foram conduzidos, atestando a eficácia do emprego desse tipo de sistema em comunidades rurais, especialmente no que diz respeito à redução da prevalência de doenças de veiculação hídrica, a partir da implementação de biofiltros. Em uma pesquisa de campo realizada na Cambódia, observou-se diminuição dos casos de diarreia de 32% (em crianças de 0 a 5 anos de idade), 46% (idades entre 6 e 14) e 51% (em pessoas maiores de 15 anos de idade) após a implantação de filtros lentos domiciliares (Liang *et al.*, 2010). No Brasil, no interior do Amazonas, Bernardes *et al.* (2018) relataram um decréscimo médio de 65% da taxa de prevalência de diarreia após intervenções em saneamento básico, incluindo a introdução de filtros lentos de areia comunitários, além de uma redução de 22% da prevalência de infecções por parasitoses intestinais.

Além da eficiência na remoção de patógenos, e conseqüente redução de doenças de veiculação hídrica, para que uma alternativa tecnológica seja considerada apropriada, deve também ser acessível economicamente, consistente com a realidade local, em termos tecnológicos, e socialmente aceitável. Em outras palavras, deve ser sustentável, desde a implantação e durante a operação e a manutenção (Di Bernardo *et al.*, 1999).

Em termos financeiros, os biofiltros tendem a apresentar custo relativamente baixo, em comparação com outras tecnologias, podendo ser considerados acessíveis do ponto de vista econômico (Shigeoka *et al.*, 2017; Desea Peru, 2017). Quanto à adaptação à realidade local, alguns estudos já demonstraram a aplicação dos filtros lentos de areia em escala domiciliar ou comunitária em áreas rurais, com sucesso, a partir do envolvimento da comunidade desde a confecção dos filtros e de treinamento técnico para a operação e manutenção (Liang *et al.*, 2010; Desea Peru, 2017; Bernardes *et al.*, 2018). Ademais, a possibilidade de utilização de materiais locais (areia, pedregulho, recipientes reutilizados) para a construção dos biofiltros favorece ainda mais a sua acessibilidade e a apropriação da tecnologia pelos usuários (Gucchi *et al.*, 2014).

Do ponto de vista da aceitabilidade social, os biofiltros já demonstraram potencial para serem bem aceitos pela comunidade (Liang *et al.*, 2010; Bernardes *et al.*, 2018), sendo que o componente humano se mostra como pilar essencial nesse sentido - incluindo treinamentos e educação sanitária e ambiental em linguagem simples, acompanhamento técnico e envolvimento da comunidade na implantação e durante a operação dos filtros. Além disso, a participação dos usuários desde o projeto e a confecção dos biofiltros e nos treinamentos técnicos contribui para o correto funcionamento do sistema e para a continuidade do uso a longo prazo (Liang *et al.*, 2010; Funasa, 2019).

Portanto, infere-se que os filtros lentos de areia para aplicação domiciliar em zonas rurais podem ser sustentáveis a longo prazo, contribuindo assim para a universalização do acesso à água de qualidade, desde que concebidos para se adequarem à realidade local, de forma a possibilitar a apropriação da tecnologia pelos usuários.

Assim, para fundamentar as escolhas feitas no projeto do biofiltro proposto neste trabalho, de aplicação domiciliar para zonas rurais, com possibilidade de implementação pelas próprias comunidades, de forma a cumprir com os objetivos do presente trabalho, essa revisão bibliográfica está organizada da seguinte forma: primeiramente, serão abordados os aspectos gerais da filtração lenta, seguidos de uma revisão acerca dos principais parâmetros de projeto e como variações nesses critérios podem afetar a eficiência da filtração. Na sequência, serão detalhados atributos diferenciais da filtração lenta para aplicação domiciliar, o que dará base, juntamente com os parâmetros de projeto revisados, à concepção e projeto do biofiltro proposto neste trabalho. Em seguida, serão explicitados elementos para o uso da filtração lenta dentro de uma abordagem de tratamento multi-barreira, envolvendo etapas anteriores e posteriores à filtração. Por fim, o emprego de mantas sintéticas na filtração lenta será estudado, bem como as propriedades adequadas dessas mantas para tal aplicação.

3.1. ASPECTOS GERAIS DA FILTRAÇÃO LENTA

De maneira geral, a filtração lenta ocorre com fluxo descendente, sendo composta, essencialmente, pelas seguintes estruturas básicas (Figura 3.3):

- coluna de água sobrenadante ou nível d'água (N.A.): responsável por garantir a carga necessária para que a água percole através do meio filtrante, além de garantir a umidade para possibilitar o estabelecimento da *schmutzdecke*;
- difusor: permite a distribuição homogênea da água bruta sobre o meio filtrante, evitando perturbações no topo da camada de areia e na microbiota da *schmutzdecke*;
- meio filtrante: composto de areia fina, promove a remoção de impurezas da água, à medida em que percola com baixa velocidade (baixa taxa de filtração);
- camada suporte: formada por pedregulho médio e grosso, sustenta o meio filtrante e impede a percolação do material fino para o sistema de drenagem;
- sistema de drenagem: coleta e conduz a água efluente (filtrada), através de tubulações e conexões, até a saída do filtro; e
- reservatório de água filtrada.

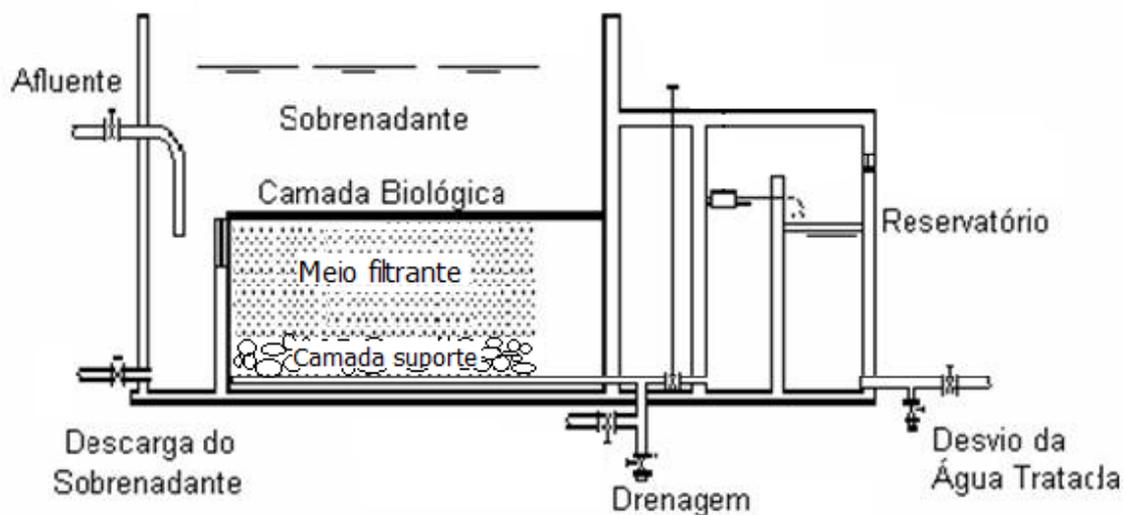


Figura 3.3: Esquema de um filtro lento de areia (Adaptado de Di Bernardo *et al.*, 2017)

Em linhas gerais, durante a operação de um filtro lento de areia (FLA), a água bruta é introduzida no topo do biofiltro, sobre o meio filtrante, formando uma coluna de sobrenadante, que vagarosamente percola pela areia em fluxo descendente, por gravidade. A água efluente – filtrada – é, então, recolhida pelo sistema de drenagem e conduzida para a saída do filtro, de onde pode ser coletada. Ressalta-se que, apesar de os filtros lentos serem comumente operados com fluxo descendente, há também a possibilidade da operação com fluxo ascendente, mediante bombeamento (Castaño e Visscher, 1987).

Tradicionalmente, os FLAs são caracterizados pela operação com baixas taxas de filtração e pela utilização de areia fina como meio filtrante. Essas características específicas da filtração lenta favorecem o desenvolvimento de uma comunidade biológica no meio filtrante, principalmente nos primeiros dois centímetros de areia (Huisman e Wood, 1974; Ellis e Wood, 1985; Di Bernardo, 1993; Logsdon, 2008; Crittenden *et al.*, 2012). Essa microbiota é conhecida como *schmutzdecke* e atua na água que percola os FLAs, favorecendo a remoção de impurezas da água (Weber-Shirk e Dick, 1997a, 1997b; Castaño *et al.*, 1999).

A atuação da *schmutzdecke* se dá principalmente através de mecanismos biológicos, que atuam predominantemente no topo da areia, onde a atividade biológica é mais intensa (Huisman e Wood, 1974; Ellis e Wood, 1985; Di Bernardo, 1993; Logsdon, 2008; Crittenden *et al.*, 2012). São vários os mecanismos biológicos que contribuem para a remoção de patógenos no filtro lento de areia, incluindo: predação de patógenos; inativação natural; decomposição biológica da matéria orgânica; efeito bactericida do sol; efeito bactericida das algas; adsorção às algas; inativação por antibióticos ou toxinas bacterianas; competição por nutrientes.

A predação de patógenos, principalmente por protozoários, tem sido um dos mecanismos mais reconhecidos na literatura (Haig *et al.*, 2015; Richards, 1977; Calvo-Bado *et al.*, 2002; Weber-Shirk e Dick, 1997a). Ademais, a competição por nutrientes, proposta por Huisman e Wood (1974), combinada com as condições ambientais presentes nos FLAs, desfavoráveis aos patógenos, especialmente àqueles oriundos do trato intestinal (Weber-Shirk e Dick, 1997a), podem ser a causa para a ocorrência do mecanismo de inativação natural, apresentado por Logsdon (1991). Por outro lado, a inativação de bactérias por toxinas tem sido considerada ineficiente, já que é improvável que sua produção seja suficiente para efetivamente remover bactérias, considerando-se a diluição e o transporte constantes pelo fluxo de água descendente (Weber-Shirk e Dick, 1997a).

Além dos biológicos, vários processos físico-químicos também atuam na remoção de impurezas particuladas presentes na água, sendo os mais relevantes (Logsdon, 1991; Castaño *et al.*, 1999; Huisman e Wood, 1974) o peneiramento, os mecanismos de transporte (interceptação, difusão e sedimentação) e as forças de adesão, todos comuns a todo tipo de filtração descendente em profundidade.

Alguns estudos sugerem ainda que a presença da *schmutzdecke* contribui para a otimização dos mecanismos físico-químicos de remoção de impurezas (Weber-Shirk e Dick, 1997a, 1997b; Joubert e Pillay, 2008). O mecanismo de adsorção de partículas aos grãos de areia, por exemplo, é facilitado pela liberação de polímeros extracelulares por alguns micro-organismos presentes nos filtros lentos (Weber-Shirk e Dick, 1997a; Jellison *et al.*, 2000; Law *et al.*, 2001; Joubert e Pillay, 2008). Além disso, o estabelecimento da *schmutzdecke*, ocupando os interstícios e envolvendo os grãos de areia, dificulta a passagem de particulados, ampliando a sua remoção pelo processo de peneiramento (Huisman e Wood, 1974; Ellis e Wood, 1985; Di Bernardo, 1993; Weber-Shirk e Dick, 1997a; Castaño *et al.*, 1999; Joubert e Pillay, 2008).

Ainda assim, de forma geral, a literatura aponta para a predominância dos mecanismos biológicos nos filtros lentos de areia, sendo esse o diferencial da filtração lenta em relação à filtração rápida (Bellamy *et al.*, 1985b; Di Bernardo, 1993; Logsdon, 2008; Haig *et al.*, 2015). Assim, sem os mecanismos biológicos reportados na literatura, apenas de 30 a 70% dos patógenos seriam removidos na filtração lenta, o que ocorreria majoritariamente por peneiramento mecânico e adsorção (CAWST, 2009). Entretanto, a real eficiência dos filtros lentos em termos microbiológicos pode chegar a 99,99% (Tabela 3.1).

Destaca-se que a eficiência da filtração lenta é, contudo, função de amadurecimento da unidade de filtração, isto é, do tempo de operação do filtro desde quando colocado em funcionamento pela primeira vez após a sua montagem. Assim, é reconhecido que os filtros lentos apenas atingem eficiência microbiológica satisfatória após amadurecimento inicial e que quanto maior o período de operação do filtro (mesmo após as limpezas), maior é a eficiência de remoção de partículas e micro-organismos (Bellamy *et al.*, 1985b; Elliot *et al.*, 2006; Haig *et al.*, 2015; Chan *et al.*, 2018). O tempo de amadurecimento dos filtros lentos de areia depende de uma série de fatores, tais como o clima local e a microbiota presentes na água bruta de abastecimento do filtro e na areia utilizada como meio filtrante.

Tabela 3.1: Eficiência da filtração lenta e níveis de remoção de parâmetros de qualidade da água reportados na literatura

Parâmetro	Residual no efluente ou eficiência	Referências
Turbidez	<1Ut	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006; Castaño e Visscher, 1987
Cor verdadeira	25 - 30%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006
	25 - 40%	Ellis e Wood, 1985
Matéria orgânica (COT)	<15 - 25%	Castaño <i>et al.</i> , 1999
Matéria orgânica (DQO)	60 - 75%	Castaño e Visscher, 1987; Gottinger <i>et al.</i> , 2011
Enterobactérias	90 - 99,9%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006; Hijnen <i>et al.</i> , 2007
Coliformes fecais	95 - 100%	Gottinger <i>et al.</i> , 2011
Vírus	99 - 99,99%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006
	~100%	Gottinger <i>et al.</i> , 2011; Castaño e Visscher, 1987
Cistos de <i>Giardia</i>	99 - 99,99%	Bellamy <i>et al.</i> , 1985a; Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006
	~100%	Gottinger <i>et al.</i> , 2011
Oocistos de <i>Cryptosporidium</i>	99,8-99,99%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Gottinger <i>et al.</i> , 2011
Ferro e manganês	30-90%	Ellis e Wood, 1985; Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006
Cercárias de esquistossoma	~100%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Visscher, 2006
Trihalometanos (THM)	<25%	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Gottinger <i>et al.</i> , 2011
Poliovírus	99,997%	Gottinger <i>et al.</i> , 2011

Por outro lado, com o passar do tempo de operação, ocorre também a colmatação dos primeiros centímetros do meio filtrante, devido à acumulação de material inorgânico e orgânico, incluindo a *schmutzdecke* (Castaño *et al.*, 1999). Isso resulta na elevação significativa da perda de carga do filtro, até o limite da carga hidráulica disponível (Logsdon, 2008), o que torna o processo de filtração consideravelmente lento, prejudicando o volume de água produzido e tornando inconveniente a continuação da carreira de filtração. Nesse momento, portanto, deve-se proceder à interrupção da operação e à limpeza da unidade filtrante. O período compreendido entre o primeiro dia de operação e a limpeza é chamado de carreira de filtração.

A limpeza dos filtros lentos de areia consiste basicamente na remoção de uma fina camada da superfície do meio filtrante (1 a 2 centímetros). Essa limpeza geralmente restaura a perda de carga a um valor próximo do estado inicial, correspondente ao meio filtrante

limpo (Logsdon, 2008). Uma das vantagens dos FLAs é justamente o fato de que as limpezas são simples, podendo ser realizadas por pessoal não qualificado, utilizando-se de ferramentas manuais (Huisman e Wood, 1974). Além disso, devido às baixas taxas de filtração aplicadas, os FLAs possuem frequência de limpeza relativamente baixa, consideravelmente menor do que nos filtros rápidos (Crittenden *et al.*, 2012). No Brasil, é comum que a carreira de filtração dos filtros lentos de areia seja de mais de 30 dias (Di Bernardo *et al.*, 2017; Almeida, 2018).

Todavia, a despeito das elevadas eficiências de remoção de impurezas e da simplicidade operacional, os filtros lentos de areia apresentam algumas limitações. A principal restrição está relacionada à qualidade da água bruta, que deve atender às recomendações da literatura, para que o FLA opere com carreiras de filtração prolongadas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Qualidade mínima da água bruta para alimentar o filtro lento de areia

Parâmetros	Valores recomendados		
	Logsdon (1991)	Di Bernardo (1993)	Castaño <i>et al.</i> (1999)
Turbidez (uT)	5	10	5-10
Cor verdadeira (uH)	-	5	5
Ferro (mg/L)	0,3	1	1
Manganês (mg/L)	0,05	0,2	1
Coliformes totais (NMP/100 mL)	-	1000	-
Algas (clorofila-a)	5 µg/L	-	-

A turbidez (representativa dos sólidos em suspensão) da água de alimentação do filtro lento de areia não deve ultrapassar 10 uT na maioria dos dias, uma vez que o excesso de sólidos suspensos pode criar condições adversas ao desenvolvimento da *schmutzdecke* e contribuir para o desenvolvimento acelerado da perda de carga, levando à redução da carreira de filtração (Di Bernardo, 1993; Di Bernardo *et al.*, 1999; Castaño *et al.*, 1999; Logsdon, 2008). Entretanto, por períodos curtos (de um ou dois dias), valores de turbidez no afluente entre 50 uT e 120 uT tendem a ser assimilados pelo filtro lento sem grandes problemas (Castaño *et al.*, 1999).

Di Bernardo *et al.* (1999), por outro lado, afirmam que a exposição dos filtros lentos de areia a picos de turbidez, mesmo que por curtos períodos, levam à redução da carreira de filtração e, por conseguinte, à necessidade de limpezas mais frequentes. Assim, para Di Bernardo *et al.* (1999), em países tropicais, como o Brasil, nas épocas chuvosas, quando

a turbidez se torna mais elevada em corpos d'água superficiais, torna-se necessária a implantação de etapa de pré-tratamento para reduzir a turbidez da água antes de alimentá-la ao filtro lento de areia.

Uma importante limitação dos filtros lentos é o tratamento de água com cor verdadeira e matéria orgânica, sendo que a sua eficiência de remoção desses parâmetros atinge, no máximo, 25 a 40% (vide Tabela 3.1). Assim sendo, os filtros lentos de areia não são indicados para o tratamento de fontes de água com presença de cor verdadeira (acima de 5 uH). Além disso, no caso da adoção de desinfecção por cloração posteriormente à filtração, existe o risco potencial de doenças crônicas associadas à formação de subprodutos de reações químicas envolvendo cloro e matéria orgânica, de forma que altas concentrações de matéria orgânica na água efluente ao filtro lento é uma preocupação, nesses casos (Castaño *et al.*, 1999).

A concentração de ferro e manganês da água bruta não deve ser elevada pois, se esses metais forem precipitados, pode haver prejuízo para a eficiência do filtro (Castaño *et al.*, 1999). Já a presença de algas pode ser benéfica, a depender da concentração desses organismos na água e das espécies presentes. Porém, pode também causar problemas diversos, como o desenvolvimento acelerado da perda de carga, variações no sabor e no odor na água tratada e potencial liberação de toxinas (Di Bernardo *et al.*, 1999), além de afetar a capacidade tamponante da água nas unidades de filtração (Castaño *et al.*, 1999).

Ademais, a filtração lenta somente é recomendada para fontes de água doce, não sendo adequada para o tratamento de água salobra, conforme se constata da matriz tecnológica do PNSR (FigurasFigura 3.1Figura 3.2). Isso porque a presença de salinidade na água bruta pode prejudicar o desenvolvimento da microbiota responsável pelos mecanismos biológicos que ocorrem nos filtros lentos de areia, essenciais para a elevada eficiência de remoção de impurezas constatada.

Além desses critérios, devido ao aspecto biológico da filtração lenta, é necessário que se garantam níveis mínimos de matéria orgânica, nutrientes e oxigênio dissolvido (OD) dentro do filtro, evitando o desenvolvimento excessivo da *schmutzdecke* (Castaño *et al.*, 1999). Normalmente, esses requisitos são atendidos pela própria composição de partículas presentes na água. Ademais, a ocorrência de zonas anaeróbias ou anóxicas

(ausência de OD) deve ser evitada, uma vez que pode afetar a qualidade da água tratada, comprometendo o sabor e o odor e provocando a ressuspensão de metais (Castaño *et al.*, 1999).

Cabe ressaltar também que, durante os primeiros dias de operação, bem como nos dias posteriores às limpezas, a qualidade microbiológica da água pode estar comprometida. Isso porque, conforme já mencionado, há a necessidade de um período de adaptação e (re)estabelecimento da *schmutzdecke* no filtro. Assim, já foi amplamente observado que, até que o filtro lento de areia esteja amadurecido, a eficiência de remoção de patógenos é reduzida (Bellamy *et al.*, 1995b; Visscher, 2006; Haig *et al.*, 2015; Chan *et al.*, 2018; Almeida, 2018). Contudo, ainda assim, o consumo da água filtrada nesses dias de menor eficiência do biofiltro do que de água bruta, sem tratamento algum, já que, mesmo nesses dias, apesar de não ideal, o biofiltro é capaz de reduzir a concentração de patógenos e de outras impurezas, que podem ser causadoras de doenças. Opcionalmente, essa água pode ser empregada para fins menos nobres, como a irrigação ou a lavagem de ferramentas manuais, de roupas ou do chão.

Além da qualidade da água bruta, aponta-se como limitação da filtração lenta a área requerida para sua instalação (0,05 a 0,10 m²/hab, segundo Di Bernardo *et al.*, 1999). De forma comparativa, Crittenden *et al.* (2012) destaca que os filtros rápidos ocupam apenas de 2 a 5% da área requerida para os FLAs para tratar volumes similares de água. Entretanto, ao se fazer essa comparação, é necessário levar em conta que a filtração lenta pode ser utilizada como etapa única de tratamento (Huisman e Wood, 1974), ao passo que os filtros rápidos, para operarem corretamente, devem ser antecedidos de outros processos unitários, como coagulação, floculação e decantação ou flotação. Esse pré-requisito eleva os custos e a área total necessária para o tratamento completo de água por meio da filtração rápida (sistema convencional). Além disso, no tratamento de água em escala domiciliar, para suprir as necessidades de uma família, a área requerida para filtração lenta, em termos absolutos, resulta razoável, sendo possível inclusive a sua alocação dentro da residência.

3.2. PARÂMETROS DE PROJETO DE FILTROS LENTOS DE AREIA

Constituem-se como parâmetros de projeto para os filtros lentos de areia a altura do sobrenadante ou coluna de água acima do meio filtrante (N.A.); a taxa de filtração; as características do meio filtrante; e o regime de operação. A seguir, detalham-se os valores mais adotados pela literatura para cada parâmetro de projeto, seguindo-se sempre de revisão acerca de variações nesses valores e de como essas variações podem afetar a eficiência da filtração lenta. Além disso, diferenciam-se parâmetros de projeto comumente recomendados para filtros lentos de areia de grande porte daqueles usualmente adotados nos biofiltros – de escala domiciliar.

3.2.1. Altura da coluna de água

A altura do sobrenadante, isto é, o nível da coluna de água (N.A.) sobre o meio filtrante, proporciona à água a carga hidráulica necessária para superar a resistência imposta pelo meio filtrante, possibilitando a sua percolação. Além disso, permite que a água bruta permaneça no filtro por algumas horas, viabilizando a ocorrência dos processos de sedimentação, aglomeração de partículas e oxidação (Ellis e Wood, 1985).

A altura do sobrenadante varia conforme as dimensões e a escala dos filtros. Em filtros lentos de areia para aplicação em estações de tratamento de água, o N.A. ideal deve estar entre 1,0 e 1,5 m (Huisman e Wood, 1974), sendo possível a operação com alturas entre 0,9 a 1,8 m (Crittenden, 2012).

Para filtros lentos de areia em escala domiciliar, de tamanho reduzido, a altura utilizada nos estudos encontrados varia entre 5 e 7 cm (CAWST, 2009; Elliot *et al.*, 2018; Terin e Sabogal-Paz, 2019). Alturas mais elevadas podem resultar em baixa difusão de oxigênio dissolvido (OD), o que pode prejudicar o desenvolvimento da *schmutzdecke*. Isso pode acontecer devido ao bloqueio da tubulação de saída, à quantidade insuficiente de areia instalada ou ao assentamento da areia nas primeiras semanas de uso. Colunas d'água muito inferiores a 5 cm podem evaporar muito rapidamente em climas quentes, causando o ressecamento da *schmutzdecke* (CAWST, 2009).

A altura da coluna de água pode ser variável ou constante, o que influencia na velocidade de percolação da água no filtro (taxa de filtração). A manutenção do N.A. constante favorece a preservação da *schmutzdecke* (Huisman e Wood, 1974) e a ocorrência do mecanismo de sedimentação de partículas (Di Bernardo e Dantas, 2005). Para tanto, devem ser implantados aparatos de controle da vazão na entrada ou na saída dos filtros, sendo que a primeira é a mais recomendada, uma vez que possibilita também a operação com N.A. variável (Castaño *et al.*, 1999).

Porém, segundo Di Bernardo e Dantas (2005), há uma tendência em se operar os filtros lentos de areia com N.A. variável. Nesse caso, o tempo de permanência da água no filtro é crescente ao longo da carreira de filtração, enquanto a taxa de filtração permanece praticamente inalterada. Isso ocorre porque o depósito gradativo de impurezas no topo da areia vai acarretando a colmatação do meio filtrante e a consequente elevação progressiva da perda de carga (Di Bernardo e Dantas, 2005). Desse modo, para compensar esse processo, o N.A. (carga hidráulica) deve aumentar gradativamente, na proporção em que a perda de carga é incrementada, de forma que a taxa de filtração permaneça constante (Goddard, 1980). Em outras palavras, o filtro deve ser reabastecido constantemente para contrabalancear a perda de carga, seja de forma manual ou por bombeamento.

3.2.2. Taxa de filtração

Tradicionalmente, os valores recomendados para a taxa de filtração em filtros lentos de areia variam entre 0,1 e 0,3 m³/m²/h, ou seja, 2,4 a 7,2 m³/m²/d (Logsdon, 1991; Castaño *et al.*, 1999; Visscher, 2006). Huisman e Wood (1974) e Goddard (1980) sugerem uma faixa de operação de até 0,4 m³/m²/h (9,6 m³/m²/d). A NBR ABNT 12.216 (BRASIL, 1992) recomenda, para filtros lentos de areia em estações de tratamento de água (ETA), que sejam feitos testes piloto para definição da taxa de filtração e, caso não seja possível, que se adote taxa de 6 m³/m²/d.

Biofiltros (filtros lentos de areia de escala domiciliar) que vêm sendo construídos em comunidades rurais ao redor do mundo através de programas como o CAWST (2009), o WSP - Water and Sanitation Program (Liang *et al.*, 2010) e o DESEA Peru (2017) também utilizam taxas de filtração similares. CAWST (2009) e DESEA Peru (2017) propõem projetos de biofiltros operando com taxa de filtração de 0,4 m³/m²/h (9,6 m³/m²/d),

enquanto o biofiltro do WSP desenvolvido na Cambodia (Liang *et al.*, 2010) opera com vazão de 0,75 L/min (o que corresponde a taxa de filtração de 0,15 m³/m²/h ou 3,6 m³/m²/d para as dimensões do referido filtro).

Segundo Ellis e Wood (1985), a operação com taxas moderadamente superiores às mencionadas não afeta significativamente a eficiência do tratamento, apenas conduz a um maior aprofundamento da atividade microbológica no meio filtrante. Nesse sentido, Timms *et al.* (1995) avaliaram o efeito da modificação da taxa de filtração de 0,3 para 0,4 m³/m²/h (7,2 para 9,6 m³/m²/d), em um filtro lento de 0,5 m de profundidade de areia, na remoção de oocistos de *Cryptosporidium* e observaram a mesma eficiência de remoção, de 99,997%, para ambas as taxas de filtração examinadas.

Da mesma maneira, Bellamy *et al.* (1985a) constataram remoções de, virtualmente, 100% dos cistos de *Giardia*, para diferentes taxas de filtração (0,96; 2,9 e 9,6 m³/m²/d). Esses autores realizaram seu estudo em três unidades filtrantes idênticas em escala piloto, empregando meio filtrante de areia com espessura de 96 cm ($d_{10} = 0,28$ mm e $d_{60} = 0,41$ mm). Logo, pode-se dizer que, de forma geral, alterações relativamente pequenas na taxa de filtração, – comuns na operação em escala real, principalmente em regime intermitente –, não conduzem a reduções significativas na eficiência da remoção de protozoários.

A retenção de bactérias e vírus nos FLAs parece, no entanto, ser influenciada pela taxa de filtração. Bellamy *et al.* (1985a) estudaram o efeito da variação da taxa de filtração na remoção desses organismos nas três unidades filtrantes (0,96; 2,9 e 9,6 m³/m²/d) e observaram que o filtro operando com a menor taxa de filtração apresentou melhores remoções de turbidez (39,18; 32,14 e 27,24%, respectivamente) e de coliformes totais (99,84; 98,45 e 98,65%, com residuais de 40, 1.000 e 4.000 coliformes/100 mL, respectivamente). As baixas remoções de turbidez foram atribuídas, pelos autores, à natureza predominantemente argilosa das partículas presentes na água bruta.

De maneira semelhante, Bauer *et al.* (2010) analisaram a influência de diferentes taxas de filtração (0,02; 0,04; 0,08 e 0,17 m³/m²/h) na remoção de fagos (indicadores de vírus patogênicos), tendo encontrado os melhores resultados para a menor taxa (0,02 m³/m²/h), com eficiências da ordem de 3,19 log para fagos somáticos e 3,25 log para fagos K-13.

Dizer (2004) também avaliou, em escala de bancada, a remoção de colifagos 241 (representativos de vírus) em seis colunas filtrantes operadas em paralelo. O objetivo desse estudo era observar a remoção dos fagos, especificamente a partir de mecanismos de adsorção. Para tanto, foi avaliada a velocidade de passagem da água pelos poros da areia (PWR), aspecto que se relaciona de forma direta à taxa de filtração. Os valores de PWR testados foram 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1 m/d. A partir dos dados experimentais, foi feita simulação matemática para modelar a remoção de fagos nos filtros estudados. O autor concluiu que, quanto maior a PWR (e, conseqüentemente, a taxa de filtração), menor era o grau de remoção dos fagos por adsorção, sendo que, para os menores valores de PWR (abaixo de 1,0 m/d, isto é, 0,04 m/h), a eficiência era aumentada significativamente.

Cabe ressaltar que os vírus são os micro-organismos mais difíceis de serem removidos através da filtração, devido ao seu reduzido tamanho. Assim, é um diferencial importante dos filtros lentos de areia a capacidade de remoção desses microrganismos, com eficiência que pode chegar a virtualmente 100% (Castaño *et al.*, 1999; Visscher, 2006; Gottinger *et al.*, 2011). Ainda assim, são poucos os estudos existentes na literatura acerca da eficiência da filtração lenta na remoção de vírus, sendo, ainda, comum o uso de agentes substitutos, como os fagos. Isso provavelmente ocorre devido aos riscos inerentes ao manuseio desses micro-organismos, sendo mais seguro o uso de substitutos.

Oki *et al.* (2017), no entanto, fizeram testes em uma unidade piloto de filtração lenta, operando com taxa de filtração de 0,15 m³/m²/h (3,6 m³/m²/d), para a remoção do vírus *Tobacco mosaic* da água de abastecimento local. Observaram, através de testes com ELISA, que após a maturação completa do filtro (cinco semanas), houve remoção de virtualmente 100% do vírus avaliado (isto é, com residuais abaixo do nível de detecção do equipamento utilizado).

Portanto, de maneira geral, percebe-se que menores taxas de filtração garantem resultados melhores de remoção de organismos na água tratada, devido aos maiores tempos de detenção da água no filtro, o que possibilita a atuação dos mecanismos de purificação por mais tempo. Ademais, segundo Anderson *et al.* (2009), taxas de filtração menores reduzem a força de cisalhamento devida à passagem da água pelos poros, diminuindo,

por consequência, o desprendimento das partículas previamente aderidas ao meio filtrante, o que favorece a melhora da qualidade da água produzida.

Além disso, o emprego de taxas de filtração mais elevadas onera a operação, apesar de reduzir os custos de construção (Bellamy *et al.*, 1985b). Isso ocorre porque a operação com taxas de filtração elevadas pode encurtar as carreiras de filtração (tempo de operação entre as limpezas) (Visscher, 2006).

Segundo Castaño *et al.* (1999), em filtros lentos de areia, a carreira de filtração costuma ser de semanas ou até meses. Porém, ela pode ser afetada por vários fatores, como o aumento da taxa de filtração, que acarreta a retenção de maior número de partículas no filtro em menos tempo. Isso acelera o processo de colmatação do meio filtrante e, conseqüentemente, leva à elevação acelerada da perda de carga (Visscher, 2006). Conforme já mencionado, quando a perda de carga atinge o seu valor máximo, dificultando a passagem da água e reduzindo a vazão de saída, faz-se necessária a limpeza do meio filtrante (Logsdon, 2008).

A duração da carreira de filtração também é influenciada pela maturação do filtro e pelo tamanho dos grãos que compõem o meio filtrante. A maturação do filtro lento, apesar de favorecer a eficiência dos mecanismos de remoção de impurezas, também contribui para o avanço da colmatação do meio filtrante. Isso ocorre devido à deposição e adesão dos particulados e dos micro-organismos no meio filtrante. Essa colmatação da areia ocasiona a elevação da perda de carga, e a redução da taxa de filtração ao longo do tempo (Elliot *et al.*, 2006), sendo necessário, então, interromper a operação para proceder à limpeza da unidade filtrante.

Em suma, a carreira de filtração se encerra com a elevação da perda de carga ao seu máximo valor, o que acarreta a imposição da limpeza. Dado que a duração da carreira de filtração dos filtros lentos é da ordem de meses, enquanto nos filtros rápidos é de algumas horas, a frequência da limpeza é relativamente baixa nas unidades de filtração lenta. Na Suécia, por exemplo, é comumente feita de 2 a 3 vezes ao ano em filtros lentos em escala real operando nas estações de tratamento (Chan *et al.*, 2018).

A limpeza é realizada por meio da remoção dos primeiros centímetros do meio filtrante (Huisman e Wood, 1974; Castaño *et al.*, 1999), exatamente onde se desenvolve a camada biológica mais abundante - a *schmutzdecke*. Uma vantagem dos filtros lentos é justamente o fato de que as limpezas, além de infrequentes, são simples, podendo ser feitas por pessoal sem treinamento, utilizando ferramentas manuais (Huisman e Wood, 1974).

O processo da limpeza geralmente restaura a perda de carga a um valor próximo do estado inicial (Logsdon, 2008) e a operação pode recomeçar, iniciando-se uma nova carreira de filtração. Contudo, com a remoção da camada superior da areia, há a consequente perda da microbiota mais ativa, o que leva à redução temporária da eficiência do filtro, por um período de alguns dias (Visscher, 2006), período que pode depender de vários fatores, como o clima local e a qualidade da água bruta.

3.2.3. Meio filtrante

O meio filtrante dos filtros lentos de areia é caracterizado por sua espessura, tamanho dos grãos coletores, diâmetro efetivo dos grãos e coeficiente de desuniformidade do meio filtrante (C_D). Tais parâmetros de projeto devem ser escolhidos segundo as necessidades do tratamento, a qualidade da água bruta e os testes de tratabilidade, além dos custos e da disponibilidade da areia.

Para filtros lentos de areia convencionais, a espessura do meio filtrante é comumente projetada entre 0,5 e 1,0 m, sendo que a espessura mínima recomendável de 50 cm deve sempre ser respeitada, mesmo com as limpezas periódicas (Castaño *et al.*, 1999). Di Bernardo *et al.* (1999) sugerem espessuras entre 0,9 e 1,0 m, sendo a mínima recomendada de 0,6 m. A NBR ABNT 12.216 (BRASIL, 1992) recomenda, para filtros lentos de areia em ETAs, espessura mínima de 0,9 m.

Por outro lado, para os biofiltros, dado seu tamanho reduzido para o uso domiciliar, a espessura mínima para o meio filtrante sugerida é de 0,5 a 0,7 m (Elliot *et al.*, 2008). Nos projetos dos biofiltros da CAWST (2009) e da DESEA Peru (2017), para confecção pela própria comunidade e aplicação em zonas rurais, foram definidas camadas de 54,5 cm de areia. Além da escala reduzida do biofiltro, o objetivo de se adotar espessuras menores para a camada de areia se deve também à tentativa de desonerar o sistema. Assim, à

medida que são feitas as limpezas (com a retirada dos primeiros centímetros de areia), a espessura do meio filtrante vai diminuindo e a areia deve ser repostada, garantindo-se assim a eficiência da remoção de impurezas e patógenos. Importante ressaltar que Visscher (2006) constatou que não há perdas significativas na eficiência dos biofiltros com camadas de areia de 0,4 m de espessura.

Bellamy *et al.* (1985b) fizeram testes em escala piloto em FLAs com espessuras do meio filtrante de 0,48 e 0,97 m. Os autores não observaram diferenças consideráveis na remoção de cistos de *Giardia*, concluindo que a remoção deste protozoário não é significativamente sensível a alterações na espessura do meio filtrante. Portanto, segundo os autores, as limpezas periódicas, com consequente redução do meio filtrante, não afetariam de forma relevante a eficiência do filtro nesse quesito (Bellamy *et al.*, 1985b).

Ressalta-se que os cistos de *Giardia* são relativamente grandes em relação a outros protozoários, sendo que a *Giardia lamblia* possui tamanho médio entre 6,35 e 12,70 μm (Di Bernardo, 1993) e a *Giardia spp.*, entre 8 e 12 μm (Siqueira-Castro *et al.*, 2016). Assim, não é possível concluir que um meio filtrante de espessura reduzida também produziria bons resultados para outros tipos de protozoários, como os oocistos de *Cryptosporidium spp.*, por exemplo, que possuem diâmetro médio entre 3 e 6 μm (Siqueira-Castro *et al.*, 2016). Ademais, com a redução da espessura do meio filtrante, deve ser considerado ainda o risco de transpasse de vírus patogênicos para a água. Isto porque quanto menor o diâmetro das impurezas, mais provável é o seu aprofundamento no meio filtrante, podendo chegar à saída do filtro, permanecendo na água filtrada.

Nesse sentido, Bauer *et al.* (2010) observaram a remoção de fagos (representativos de vírus patogênicos) em filtros lentos de areia operando com variadas combinações entre espessuras de meio filtrante (30, 60 e 90 cm) e taxas de filtração consideravelmente baixas, mesmo para a filtração lenta (0,48 e 0,96 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$). Verificaram que quanto maior a espessura do meio filtrante, melhores foram as eficiências para remoção de fagos para ambas as taxas de filtração (1,55, 2,03 e 3,19 log, respectivamente, para a menor taxa de filtração; e 1,06, 1,40 e 2,25 log, para 0,96 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$).

Dessa maneira, pode-se dizer que buscando um compromisso entre os parâmetros de projeto, a elevação da taxa de filtração é possível, desde que acompanhada pelo aumento

da espessura do meio filtrante, mantendo-se a eficiência do tratamento. De forma semelhante, para a redução da espessura, há que se reduzir também a taxa de filtração, tal que a eficiência se mantenha. Além disso, a espessura também pode ser reduzida com o emprego de mantas sintéticas no topo do meio filtrante (Di Bernardo *et al.*, 1999; Almeida, 2018), assunto que será discutido mais detalhadamente no item 3.5.

Além da espessura do meio filtrante, a granulometria da areia utilizada também deve ser considerada na montagem de filtros lentos de areia. Tradicionalmente, emprega-se granulometria fina, de forma a possibilitar o escoamento lento da água, isto é, baixa taxa de filtração.

Para tanto, o parâmetro utilizado é o diâmetro efetivo (d_{10}), isto é, a abertura da peneira através da qual passa 10% em peso do meio filtrante. Para a filtração lenta, o diâmetro efetivo da areia utilizada deve variar entre 0,15 e 0,35 mm (Di Bernardo *et al.*, 2017; Logsdon, 2008; Huisman e Wood, 1974; NBR ABNT 12.216/1992; Crittenden *et al.*, 2012).

Ressalta-se que areias finas, na faixa dos diâmetros supracitados, possuem elevado custo (Muhammad *et al.*, 1996). Ademais, quanto menor o diâmetro dos grãos coletores, mais efetivos são os mecanismos de remoção de partículas, mas, por outro lado, mais rapidamente se atinge a perda de carga máxima, levando à necessidade da limpeza mais recorrente (Muhammad *et al.*, 1996). Esses autores, ao avaliarem o aumento do diâmetro efetivo da areia de 0,20 para 0,45 mm, não observaram diferenças significativas na remoção de turbidez, que passou de 99,5% para 96,2%, tendo sido considerado ainda um bom desempenho.

De maneira similar, Anggraini *et al.* (2015) estudaram a influência do tamanho dos grãos na eficiência de filtros lentos de areia, por meio de ensaios de bancada com meios filtrantes de diferentes diâmetros efetivos (0,075; 0,15; 0,26; 0,40; e 0,50 mm). Os autores concluíram que, dentro da faixa de valores considerada, o tamanho dos grãos não afetou significativamente a remoção de turbidez e de sólidos em suspensão. Todas as unidades filtrantes avaliadas, independentemente do diâmetro efetivo da areia utilizada, promoveram remoção satisfatória de aproximadamente 99% para turbidez e 96% para número de partículas.

Bellamy *et al.* (1985b) também avaliaram a influência de vários diâmetros efetivos (0,13; 0,28; e 0,62 mm) na remoção de bactérias (*E. coli*) e de cistos de *Giardia* por filtros lentos de areia. Como resultado, para remoção de bactérias, observaram uma relação inversa, sendo que o uso de grãos menores gerou eficiências maiores, com remoções de 99,4%, 98,6% e 96%, respectivamente. Para *Giardia*, constataram remoção de virtualmente 100% dos cistos, para todos os diâmetros efetivos testados.

Almeida (2018) comparou o desempenho de filtros lentos de areia em escala piloto operando com areia de diâmetros efetivos de 0,27 e 0,51 mm. Como resultado, não observou diferenças estatisticamente significativas, em termos de turbidez, sendo que o filtro de areia mais fina produziu efluentes com residuais ligeiramente inferiores ao filtro de areia grossa (médias de 0,4 uT e 0,5 uT, respectivamente), todos atendendo ao padrão de potabilidade de 1,0 uT para efluentes de filtros lentos, estabelecido para consumo humano – Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), alterado pela Portaria GM/MG nº. 888 (BRASIL, 2021). Também não foram constatadas diferenças estatisticamente significativas para a remoção de coliformes totais entre os filtros avaliados. Para a análise de traspasse de microesferas fluorescentes de poliestireno (representativas de oocistos de *Cryptosporidium*), as unidades filtrantes de areia fina produziram melhores resultados, com eficiência média de 2,78 log contra 2,40 log para os filtros de areia grossa (Almeida, 2018).

Outro aspecto do meio filtrante a ser avaliado para utilização em FLAs é o coeficiente de desuniformidade (C_D), dado pela razão entre a abertura da peneira pelo qual passam 60% dos grãos da areia (d_{60}) e o diâmetro efetivo (d_{10}). Segundo Cittenden (2012), em filtros lentos, não há a necessidade de areias tão uniformes quanto em filtros rápidos, os quais operam com areias com $C_D < 1,4$.

Di Bernardo *et al.* (1999) preconizam coeficientes de desuniformidade menores do que 5,0, preferivelmente entre 2,0 e 5,0. Castaño *et al.* (1999) sugerem que o valor ideal para o C_D deve estar entre 2,0 e 4,0, podendo chegar a 5,0. Huisman e Wood (1974) são mais conservadores, ao recomendar valores abaixo de 2,0, considerando aceitáveis areias com coeficientes de desuniformidade de até 3,0. Crittenden (2012) também recomenda areias mais uniformes, com C_D abaixo de 2,5. Já a NBR ABNT 12.216 (BRASIL, 1992)

recomenda que seja abaixo de 3,0, para aplicação em ETAs. Conforme Fogel *et al.* (1993), o uso de areias com coeficientes de desuniformidade acima dos recomendados pode afetar significativamente a eficiência dos filtros lentos de areia. Apesar das recomendações presentes na literatura, poucos são os estudos relacionando a eficiência dos FLAs com a uniformidade do meio filtrante.

Di Bernardo e Escobar (1996) *apud* Di Bernardo *et al.* (1999) testaram areias com coeficientes de desuniformidade variando de 2,2 a 4,3 em filtros lentos de areia com 0,70 m de espessura de meio filtrante, composto por areia de diâmetro efetivo da ordem de 0,2 mm, operando com taxas de filtração de 3,0 a 12,0 m³/m²/d. Os autores verificaram que quanto maior o coeficiente de desuniformidade, mais profunda foi a penetração de impurezas no meio filtrante observada, o que resultou em carreiras de filtração mais longas, sem prejuízos significativos para a água filtrada. Entretanto, destaca-se que esse aprofundamento das impurezas na areia pode vir a afetar carreiras de filtração posteriores, com eventual transpasse de impurezas para a água tratada. Dessa forma, a necessidade de uma lavagem completa (de todo o meio filtrante) seria antecipada.

Vale destacar que para aplicação em biofiltros, em comunidades rurais, a depender da realidade local, pode não ser viável a determinação do diâmetro efetivo e do coeficiente de desuniformidade da areia disponível, sendo mais comum o foco apenas na granulometria. Além disso, os biofiltros são normalmente construídos a partir de material disponível localmente, enquanto a areia empregada em FLAs tradicionais provém muitas vezes de fontes comerciais, possuindo um maior controle de qualidade acerca das faixas granulométricas, diâmetro efetivo e coeficiente de desuniformidade (Elliot *et al.*, 2008).

Assim, a partir de análise pautada somente na granulometria, a areia para o meio filtrante do biofiltro pode ser selecionada a partir do uso de peneiras apenas, facilitando e viabilizando a aplicação dessa tecnologia. Segundo Di Bernardo *et al.* (2017), o tamanho dos grãos deve estar compreendido entre 0,08 e 1,0 mm para aplicação na filtração lenta. CAWST (2012), para a confecção do seu biofiltro, sugere o uso de toda areia que passa pela peneira de 0,7 mm, isto é, toda areia com granulometria menor do que 0,7 mm.

Desse modo, garante-se a utilização de areia fina para assegurar a baixa taxa de filtração requerida para o desenvolvimento da *schmutzdecke* e para a eficiência do sistema, porém

sem um conhecimento mais aprofundado da areia utilizada. Contudo, ressalta-se que alguns procedimentos podem e devem ser conduzidos de maneira a garantir a eficiência da filtração lenta, mesmo sem esses detalhamentos. Assim, a areia deve ser lavada e secada ao sol e deve atender a alguns critérios, os quais serão mais explorados no item **Error! Reference source not found.** dos Resultados e Discussão, onde serão apontados métodos para a seleção *in loco* da areia adequada à filtração lenta. Dentre estas técnicas, destacam-se os testes acerca da proporção da composição da areia (silte-argila-areia) e o “jar teste”, que podem ser feitos localmente, a fim de verificar se a areia disponível é capaz de propiciar taxa de filtração adequada à filtração lenta.

3.2.4. Regime de operação

A operação dos filtros lentos de areia pode ser intermitente ou contínua. Tradicionalmente, os FLAs são operados continuamente (Logsdon, 2008), com auxílio do uso de bombas. Porém, para fins domiciliares, especialmente em comunidades rurais, tem sido comum operá-los em regime intermitente, com alimentação de um volume pré-determinado de água, pelos próprios usuários. A água, então, é tratada no período de pausa, ou seja, no espaço de tempo entre os abastecimentos.

Durante o período de pausa, a água ocupa os interstícios do meio filtrante, não havendo percolação da água. Assim, o meio permanece saturado, o que contribui para a preservação da *schmutzdecke* e para a eficiência do tratamento da água. Essa interrupção do fluxo de água ocorre devido a um detalhe construtivo dos filtros lentos de areia, que será explicitado mais à frente, em que a tubulação de saída fica situada acima do nível do meio filtrante.

CAWST (2012) recomenda que se aguarde pelo menos 1 hora após a interrupção do fluxo de água na saída do biofiltro para o reabastecimento do filtro. Essa nova carga de água bruta dá início então a um novo ciclo de filtração, assim entendido como o período compreendido entre a adição de um volume de água até a sua completa filtração, visualizada pelo fim do escoamento da água filtrada na saída do filtro. Além disso, o período de pausa deve ser de no máximo 48 horas (CAWST, 2009), garantindo-se assim o suprimento dos nutrientes e OD para a *schmutzdecke*.

Logsdon (2008) defende o abastecimento contínuo dos FLAs, uma vez que, segundo o autor, o estabelecimento da *schmutzdecke* no meio filtrante depende da entrada constante de nutrientes e oxigênio na unidade filtrante. Assim, interrupções longas no fornecimento de água bruta podem levar à depleção de oxigênio e à consequente eliminação parcial ou total da microbiota, o que pode acarretar prejuízos na eficiência dos filtros. Visscher (2006) também concluiu, de sua consulta a especialistas de todo o mundo, que a intermitência leva à deterioração mais rápida da qualidade microbiológica da água tratada, comparativamente ao modo contínuo de operação. De fato, Haig *et al.* (2015) observaram que os períodos de “drenagem” (reduzida altura de sobrenadante sobre o meio filtrante) impactaram negativamente na eficiência dos FLAs estudados, o que foi associado à redução na uniformidade da *schmutzdecke*.

Young e Madramootoo (2014) analisaram duas colunas de filtração lenta em escala de bancada, ambas projetadas igualmente e operando com a mesma água bruta, porém com diferentes regimes de operação. A unidade filtrante de operação contínua produziu eficiências melhores do que a de regime intermitente, na remoção de *E. coli* (3,71 log contra 1,67 log), bacteriófagos M2S (2,75 log contra 0,85 log) e turbidez (95% contra 87%).

Elliot *et al.* (2008) observaram, em biofiltros no Canadá (Figura 3.4), eficiências bem abaixo daquelas encontradas normalmente para filtros lentos de areia em operação contínua. Os autores obtiveram água com turbidez entre 0,65 e 1,4 uT na saída dos biofiltros já maduros, que estavam tratando águas brutas com valores baixos de turbidez, entre 1,86 e 8,96 uT, com média de 3,90 uT. A baixa eficiência foi atribuída à maior taxa de filtração e menor espessura do meio filtrante dos biofiltros em comparação aos filtros lentos tradicionais.

Contudo, Young e Madramootoo (2014) ressaltam que o biofiltro fornece melhoria significativa da qualidade da água, sendo, portanto, preferível o consumo de água tratada pelo filtro lento intermitente ao consumo da água sem tratamento. A título de exemplo, um estudo conduzido em biofiltros em várias residências rurais na Cambódia, constatou-se que a água filtrada e reservada apresentava qualidade bem superior à água bruta consumida localmente, com turbidez 80% menor e concentração de *E. coli* 69% menor (Liang *et al.*, 2010).

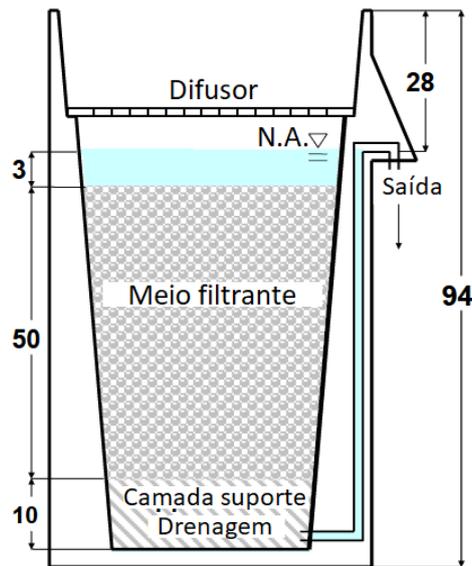


Figura 3.4: Vista em corte do biofiltro avaliado por Elliot *et al.* (2006), medidas em cm

Nesse sentido, estudos vêm demonstrando as consequências positivas do uso desse tipo de tecnologia em áreas rurais, com redução significativa de casos de diarreia e outras doenças de veiculação hídrica (Bernardes *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2010). Assim, no contexto da universalização do acesso à água de qualidade, considerando a simplificação para os usuários, a alternativa tecnológica dos biofiltros deve ser uma opção a ser considerada, desde que tomados os devidos cuidados com a manutenção da comunidade biológica, garantindo-se a umidade no filtro durante toda a operação (fonte de oxigênio e nutrientes) (Young e Madramootoo, 2014).

Nesse sentido, faz-se pertinente a avaliação do volume a ser abastecido a cada ciclo para, além de garantir a manutenção da *schmutzdecke*, gerar o melhor resultado em termos de eficiência do biofiltro. Elliot *et al.* (2006) avaliaram dois biofiltros experimentais em Alberta, no Canadá, com capacidade para produção diária de 60 litros. As unidades filtrantes foram operadas com abastecimento de cargas diárias de 20 e 40 litros, resultando em taxas de filtração entre 0,8 e 1,1 L/min (isto é, 1,1 e 1,6 m/d). Os autores relataram um efeito positivo da redução da carga (de 40 para 20 L/d) na remoção de *E. coli*, principalmente durante a maturação dos filtros (de 73,6% para 95%, nos primeiros 30 dias de operação; e de 97,5% para 99,5% nos filtros maduros). Segundo os autores, a melhoria na eficiência dos biofiltros com menor carga diária se deve ao maior tempo de detenção da água nas unidades filtrantes.

Corroborando os achados de Elliot *et al.* (2006), Baumgartner *et al.* (2007) também verificaram melhores eficiências na remoção de coliformes totais para filtros com cargas de abastecimento menores (84,2% contra 81% para cargas diárias de 20 e 10 litros, respectivamente). Estes autores também deduziram que o maior tempo de detenção é favorável à qualidade microbiológica da água filtrada, tendo verificado que uma pausa de 36 horas no abastecimento gerou resultados superiores ao período de pausa de 12 horas, para coliformes totais (79,1% contra 73,7% para cargas de 20l/d e 81% contra 78,3% para o abastecimento de 10 L/d).

Terin e Sabogal-Paz (2018) não observaram diferenças estatisticamente significantes na eficiência de dois filtros lentos de areia em escala domiciliar, sendo que um deles operava de forma contínua e o outro em modo intermitente (Figura 3.5), em São Carlos, no Brasil. Os filtros lentos operados intermitentemente eram abastecidos quatro vezes ao dia (8:00, 12:00, 16:00 e 20:00), resultando em dois diferentes períodos de pausa (ou tempos de detenção), de 4h e de 12h.

Em termos de turbidez, o filtro contínuo (C-HSSF) forneceu os melhores resultados, com residuais menores do que 1,0 uT para 100% das amostras avaliadas. Para a operação intermitente, os tempos de detenção de 12h e de 4h garantiram residuais menores que 1,0 uT em 98,14% e em 95,24% das amostras, respectivamente. O mesmo padrão se repetiu para coliformes totais, isto é, eficiência maior do filtro contínuo, seguido pelo I-HSSF 12h e por último, com menor eficiência, o I-HSSF 4h. Tais resultados estão de acordo com os estudos anteriores, de que os filtros lentos operados de modo contínuo tendem a produzir água com melhor qualidade do que os filtros lentos abastecidos de forma intermitente. Os valores obtidos também corroboram a informação de que maiores tempos de detenção estão associados à maior eficiência dos filtros lentos.

Terin e Sabogal-Paz (2018) constataram ainda que todos os filtros avaliados apresentaram remoções próximas de 75% de microcistina-LR (concentração afluyente de $\pm 1 \times 10^5$ células/mL), com residuais médios de $5,187 \pm 2,83 \mu\text{g/L}$. Neste quesito, o filtro I-HSSF 12h foi o que apresentou comportamento mais estável com residuais de microcistina-LR abaixo de $1,0 \mu\text{g/L}$ durante toda a operação.

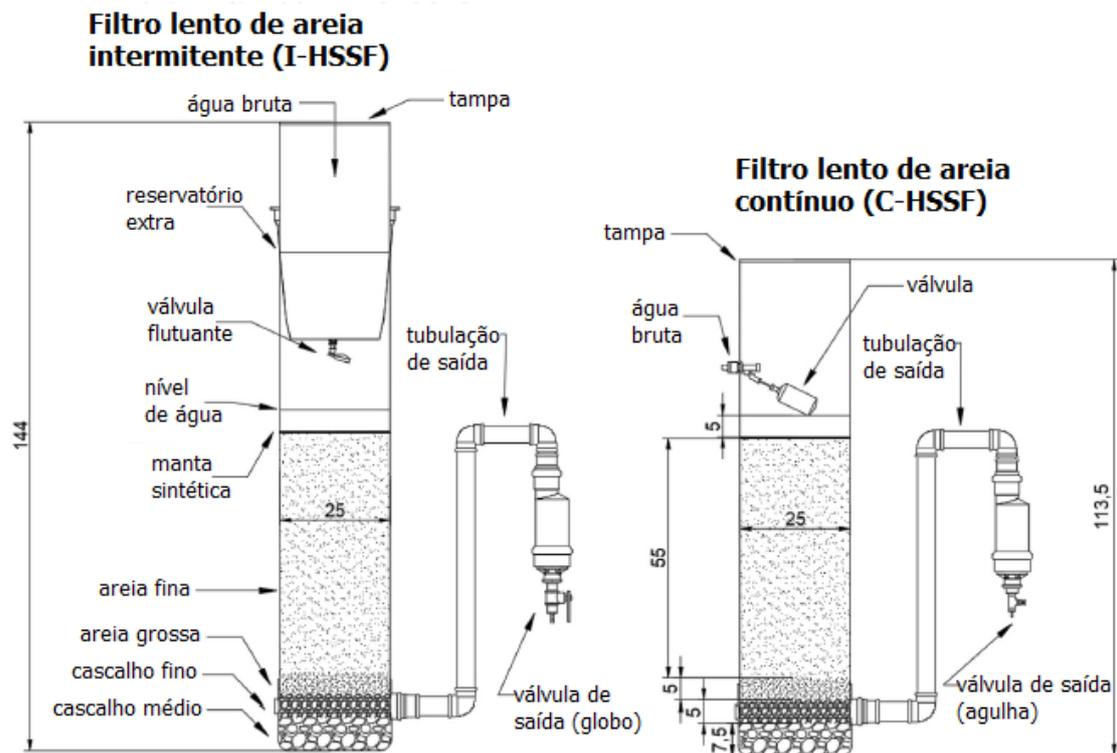


Figura 3.5: Unidades filtrantes avaliadas por Terin e Sabogal-Paz (2018), medidas em cm

De modo geral, ao operar biofiltros em escala real, melhores resultados podem ser obtidos através da introdução de volume de água menor do que o volume dos poros, de forma que toda a água bruta esteja em contato com o meio filtrante durante o tempo de pausa (Elliot *et al.*, 2008). Outra possibilidade é que seja previsto maior intervalo de tempo entre as recargas, garantindo-se assim maior tempo de detenção (Elliot *et al.*, 2008).

Por fim, ressalta-se que a previsão do volume de abastecimento do biofiltro para fins de projeto deve levar em conta as dimensões do biofiltro (especialmente o volume de água que o próprio filtro é capaz de acomodar acima do meio filtrante e a sua área em planta), a taxa de filtração adequada e a produção desejada (ou vazão de projeto).

A Tabela 3.3 resume os parâmetros de projeto usualmente adotados para a operação de filtros lentos de areia, segundo as recomendações da literatura. De forma geral, observa-se que esses filtros são usualmente operados com reduzidas taxas de filtração, geralmente mantidas constantes através de variações na altura do sobrenadante (carga hidráulica) e meio filtrante composto por areia fina relativamente uniforme. Quanto ao regime de operação, ambos os regimes (contínuo ou intermitente) podem ser aplicados, sendo que

o regime intermitente (biofiltros), por estar associado à maior facilidade operacional, tem sido mais empregado no contexto da aplicação domiciliar, apesar de gerar água tratada com qualidade inferior aos filtros operados continuamente. Destaca-se que, quanto ao meio filtrante, não há informações consolidadas na literatura a respeito do diâmetro efetivo e do coeficiente de desuniformidade da areia para biofiltros, uma vez que, conforme supramencionado, a determinação desses parâmetros é muitas vezes inviabilizada, pela própria localização da implantação desses filtros, em áreas rurais ou isoladas.

Tabela 3.3: Resumo dos parâmetros de projeto usualmente adotados na filtração lenta

Parâmetro de projeto	FLA convencional	Referências	Biofiltro	Referências
Altura do sobrenadante (m)	0,9 a 1,5	Huisman e Wood, 1974; Crittenden, 2012	0,05	Terin e Sabogal-Paz, 2018; Elliot <i>et al.</i> , 2018; CAWST, 2009
Taxa de filtração (m ³ /m ² /d)	2,4 a 9,6	Huisman e Wood, 1974; Goddard, 1980; Logsdon, 1991; Castaño <i>et al.</i> , 1999	2,4 a 9,6	CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017
	constante		variável (declinante)	Elliot <i>et al.</i> , 2018; Terin e Sabogal-Paz, 2018
Espessura do meio filtrante (m)	0,6 a 1,2	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Di Bernardo <i>et al.</i> , 1999	0,5 a 0,7	Elliot <i>et al.</i> , 2018; CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017
			Mínima	0,6
Tamanho dos grãos (mm)	0,08 a 1,0	Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017	<0,7	CAWST, 2012
Diâmetro efetivo (mm)	0,15 a 0,35	Huisman e Wood, 1974; NBR ABNT 12.216/1992; Logsdon, 2008; Crittenden <i>et al.</i> , 2012; Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017	-	-
Coeficiente de desuniformidade	2,0 a 5,0	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Di Bernardo <i>et al.</i> , 1999	-	-
Regime de operação	contínuo	Logsdon, 2008	intermitente	CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017; Terin e Sabogal-Paz, 2018; Elliot <i>et al.</i> , 2018

3.3. FILTRAÇÃO LENTA DOMICILIAR

Conforme explicitado anteriormente, dentre as alternativas tecnológicas para tratamento descentralizado de água, os filtros lentos de areia se apresentam como uma opção importante a ser considerada, sendo recomendada inclusive pelo Programa Nacional de Saneamento Rural – PNSR, quando disponíveis fontes de água doce superficiais ou de aquíferos livres (Funasa, 2019). Isso porque podem ser utilizados como etapa única de tratamento em muitos casos, promovendo melhoria significativa da qualidade microbiológica da água, além de serem acessíveis financeiramente em relação a outras tecnologias, de simples operação e possibilitarem o emprego de materiais e de mão-de-obra locais para confecção, operação e manutenção.

Assim sendo, a filtração lenta de areia pode ser considerada uma tecnologia apropriada ao uso descentralizado, podendo ser adaptada para ser sustentável no longo prazo, dos pontos de vista econômico, técnico e social. Em análise comparativa de várias tecnologias de uso descentralizado, Sobsey *et al.* (2008) consideraram o biofiltro como sendo a tecnologia mais sustentável dentre os métodos avaliados - filtro de cerâmica, desinfecção por cloro livre, SODIS (desinfecção solar da água) e coagulação/cloração. O estudo levou em conta os seguintes aspectos: custo inicial; custos associados ao uso; necessidade de reposição de materiais ou peças; redução do índice de diarreia na população; melhora da qualidade microbiológica da água; continuidade do uso após a instalação; quantidade de água produzida; e facilidade no uso.

Além disso, a filtração lenta pode ser considerada uma tecnologia social, isto é, pode ser desenvolvida e aplicada na interação com a população e apropriada por ela. De fato, se chegou à conclusão de que a participação da comunidade no processo de implantação dos biofiltros, a partir de programas de treinamento e capacitação da população local quanto à educação sanitária, às práticas de higiene e à operação e manutenção dos filtros são quesitos fundamentais para o sucesso da continuidade e efetividade do uso da tecnologia (Ferreira *et al.*, 2014; Gucchi *et al.*, 2014; DESEA Peru, 2017; Bernardes *et al.*, 2018; Funasa, 2019).

Vale ressaltar, no entanto, que o envolvimento da comunidade somente se concretiza quando essa educação sanitária ocorre de maneira dinâmica e construtiva, com

abordagem clara e objetiva, utilizando-se de linguagem simples, acessível e adequada ao nível de conhecimento do usuário, de preferência com exemplos voltados a sua realidade prática (Ferreira, 2012). Assim, os treinamentos e os diálogos com a comunidade devem ser pautados não somente na exposição, mas na troca de saberes e de conhecimentos, reconhecendo-se as peculiaridades locais, suas tradições e hábitos, além das relações interpessoais e com o ambiente (Funasa, 2019).

Outro fator que pesa em favor dos biofiltros é a melhora da aparência (clarificação) e do gosto promovidos por esse tratamento, enquanto outros métodos de aplicação domiciliar, como a cloração e a desinfecção solar, não apresentam os mesmos benefícios (Schmidt e Cairncross, 2009). Essas características organolépticas da água para consumo humano são de extrema importância nesse contexto, uma vez que refletem diretamente na aceitabilidade e na apropriação da tecnologia pelos usuários, que podem deixar de consumir a água tratada, em troca de águas mais clarificadas ou de gosto melhor, que não necessariamente apresentam melhor qualidade microbiológica (Liang *et al.*, 2010).

Os filtros de cerâmica, também bastante aplicados no contexto do uso domiciliar, possuem essas mesmas vantagens (melhoria do gosto e da cor da água), porém, diferentemente dos biofiltros, são pouco eficientes em relação à remoção de patógenos (Schmidt e Cairncross, 2009; Ferreira *et al.*, 2014). Além disso, exigem a reposição de peças (vela) em curto espaço de tempo e demandam água limpa para a limpeza frequente dos recipientes de cerâmica que compõem o filtro (Sobsey *et al.*, 2008; Schmidt e Cairncross, 2009; Ferreira *et al.*, 2014), nem sempre disponível em áreas rurais. Por outro lado, apesar de não demandarem a reposição de peças ao longo da operação, os biofiltros também requerem água limpa para a sua limpeza periódica (CAWST, 2012).

Os filtros lentos de areia podem ser aplicados enquanto solução comunitária (Bernardes *et al.*, 2018) ou individual, em âmbito domiciliar ou unifamiliar. Estes últimos, aqui definidos como biofiltros, podem ser diferenciados entre os de grande porte, que visam atender a todas as demandas por água da residência (Leal, 2016; Reis, 2019) e os de pequeno porte, destinados a atender os usos mais urgentes, como a hidratação, a higiene das mãos e o uso no preparo de alimentos (CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017; Liang *et al.*, 2010; Gucchi *et al.*, 2014; Elliot *et al.*, 2008). Essa diferenciação será explicitada a seguir, a partir dos estudos de caso encontrados na literatura.

Em estudo realizado acerca da continuidade do uso e da eficiência de biofiltros unifamiliares de pequeno porte instalados em residências rurais na Cambódia (Figura 3.6), por organizações não-governamentais regionais, observou-se que, de 336 domicílios inicialmente contemplados com os filtros, 294 (87,5%) ainda se encontravam em uso, após períodos que variavam de 6 meses a 8 anos da sua implantação (Liang *et al.*, 2010). Essa elevada taxa de continuidade do uso demonstra a real possibilidade de operação e de manutenção desse tipo de sistema pelos próprios usuários, quando bem instruídos, e de apropriação e incorporação da tecnologia em suas rotinas.



Figura 3.6: Biofiltros implantados na Cambódia (Liang *et al.*, 2010)

Dentre aqueles domicílios que não mais estavam utilizando o sistema (12,5%), 13 (62%) citaram insatisfação com a cor, gosto ou cheiro da água tratada; 6 (29%) afirmaram incapacidade de reparar algum problema encontrado ou sentiram que o filtro não funcionava conforme o esperado; e 2 (10%) reportaram que doaram os seus filtros (Liang *et al.*, 2010). Ainda segundo a pesquisa, a continuidade no uso dos sistemas de filtração lenta domiciliar avaliados depende de ou está associado a (Liang *et al.*, 2010): treinamento adequado sobre a operação e a manutenção do filtro; desuso em épocas de chuva, devido à facilidade de acesso à água clarificada, aparentemente apropriada para consumo; quantidade de água filtrada insuficiente para todos os usos pretendidos; utilização de água fervida como alternativa; consumo da água bruta (não-tratada) direto da fonte ou de *container*. Esses aspectos levantados podem ser considerados gargalos nos sistemas descentralizados de filtração lenta, que podem ser aperfeiçoados em novos

projetos.

Segundo explicado anteriormente, quando empregados para uso domiciliar, para atender às demandas básicas da residência, há uma tendência de se operar os filtros lentos de areia (biofiltros) com espessura do meio filtrante reduzida, com vistas a reduzir os custos iniciais com areia, e em regime intermitente, com abastecimento manual da água bruta (CAWST, 2009; Liang *et al.*, 2010; Gucchi *et al.*, 2014; DESEA Peru, 2017).

Outro aspecto que deve ser considerado na concepção dos filtros lentos de areia (de qualquer volume) é a instalação da tubulação de saída da água filtrada em cota superior à do meio filtrante. Isso para que o meio filtrante permaneça submerso, mesmo quando não ocorra abastecimento ou o filtro se encontre fora de operação, preservando-se, assim, a *schmutzdecke* (Elliot *et al.*, 2006; Guchi *et al.*, 2014; SESAN/MDS, 2016). Elliot *et al.* (2008) recomenda que a saída de água deve estar de 2 a 7 cm acima da altura do meio filtrante.

Ademais, é comum que se instale uma placa difusora da água bruta alguns centímetros acima do topo do meio filtrante, de forma que, no momento do abastecimento manual, a entrada de água no filtro seja uniforme e evite distúrbios à *schmutzdecke* (Elliot *et al.*, 2006; CAWST, 2009; Gucchi *et al.*, 2014; Elliot *et al.*, 2008). A placa difusora pode ser metálica ou plástica com aberturas de aproximadamente 2 mm de diâmetro (Elliot *et al.*, 2008; CAWST, 2012), espaçados de 1,5 a 2,5 cm (DESEA Peru, 2017). É possível observar o detalhamento dessas peculiaridades no esquema do biofiltro avaliado por Elliot *et al.* (2006), apresentado anteriormente (Figura 3.4). O mesmo pode ser constatado no biofiltro proposto por CAWST (2009) e ainda nos filtros lentos em uso em residências na Etiópia estudados por Gucchi *et al.* (2014) (Figura 3.8).

O biofiltro unifamiliar da CAWST (versões 2009 e 2012; Figura 3.7: Filtro lento de areia de concreto para uso domiciliar, por CAWST (2009)) foi concebido para ser confeccionado e implantado pelos próprios usuários, para atender às demandas básicas da residência, em áreas rurais ou isoladas. O manual da CAWST contém informações acerca dos mecanismos de funcionamento dos biofiltros, além de instruções detalhadas sobre a confecção, a operação e a manutenção dos filtros. Quanto aos aspectos operacionais, o biofiltro foi concebido para o abastecimento manual de água (regime

intermitente), com taxa variável declinante, sendo a máxima sugerida de 400 L/h/m² (isto é, 0,4 m³/m²/h ou 9,6 m³/m²/d) e espessura do meio filtrante de 54,3 cm, composto por areia fina com granulometria menor do que 0,7 mm.

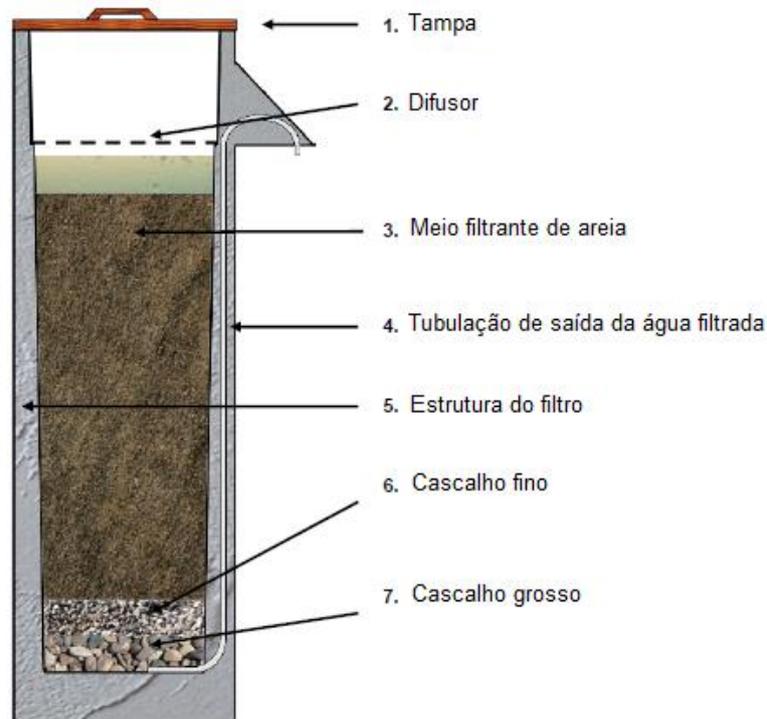


Figura 3.7: Filtro lento de areia de concreto para uso domiciliar, por CAWST (2009)

Os filtros avaliados por Gucci *et al.* (2014) foram confeccionados de forma mais artesanal, construídos em potes de argila adaptados da produção local, preenchidos com cascalho, areia grossa e areia fina - materiais disponíveis localmente. Estes filtros unifamiliares de pequeno porte visam o atendimento apenas das demandas básicas da residência, com a produção de até 40 litros por dia. Pode-se observar, na Figura 3.8, o uso de uma placa perfurada de cerâmica, com a função do difusor, de forma a uniformizar e amenizar a intensidade do fluxo de água de abastecimento por sobre o meio filtrante. Verifica-se, ainda, a tubulação de plástico que pode ser removida do topo do pote de argila, permitindo a retirada da água filtrada e nos demais momentos, deve sempre estar afixada ao topo do pote, para garantir a umidade no meio filtrante continuamente (Gucci *et al.*, 2014).

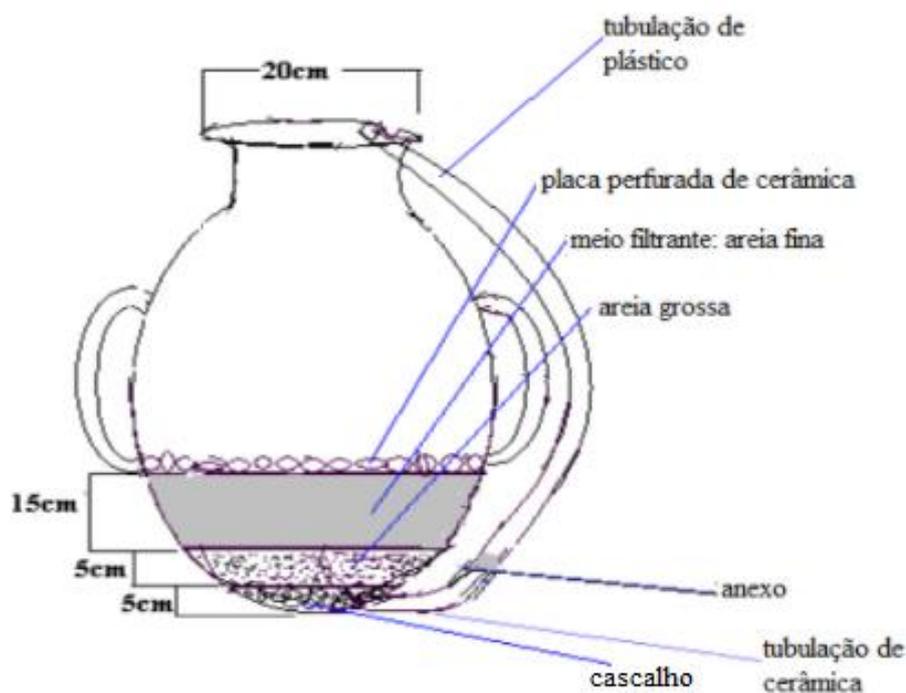


Figura 3.8: Biofiltro em pote de cerâmica estudado por Gucchi *et al.*, 2014

Apesar da reduzida espessura do meio filtrante (15 cm) em relação ao recomendado pela literatura (vide

Tabela 3.3) e do uso de areia e cascalho encontrados e manejados localmente, Gucchi *et al.* (2014) constataram eficiências médias de 97,9%, 96,5 % e 93,1%, na remoção de coliformes totais, coliformes termotolerantes e turbidez, respectivamente. Dentre as amostras analisadas, 47,5% foram consideradas seguras em termos de coliformes totais e 45%, de coliformes termotolerantes, com densidade de coliformes abaixo da capacidade de detecção do método utilizado.

Verifica-se, portanto, que a utilização de materiais e mão de obra locais, como nos filtros estudados por Gucchi *et al.* (2014) e aquele proposto por CAWST (2009, 2012), além de promoverem o acesso à água de melhor qualidade, viabiliza o emprego dos biofiltros no contexto rural. Além disso, favorecem o envolvimento da comunidade local, o que, por sua vez, facilita a apropriação da tecnologia pela população. Isso acarreta maior chance de que os usuários façam correta operação e manutenção dos filtros e continuem utilizando a tecnologia a longo prazo, aumentando, assim, a sua vida útil e garantindo o acesso à água de qualidade para essas populações (Schmidt e Cairncross, 2009; Liang *et*

al., 2010).

Ainda no que concerne à acessibilidade dos materiais utilizados na confecção dos biofiltros, a instituição DESEA Peru adaptou o filtro proposto por CAWST (2009), substituindo o concreto por plástico PVC na construção do filtro (Figura 3.9). A proposta encontra-se detalhada em manual específico (DESEA Peru, 2017) e se justifica pelo fato de o PVC ser mais leve, o que facilita o transporte dos biofiltros para as comunidades rurais localizadas em áreas remotas da Cordilheira dos Andes, no sul do Peru, onde atua a organização. Segundo dados da página *on-line* da instituição, até novembro de 2022, haviam sido instalados 570 biofiltros em residências e escolas, beneficiando diretamente mais de 4.000 pessoas.

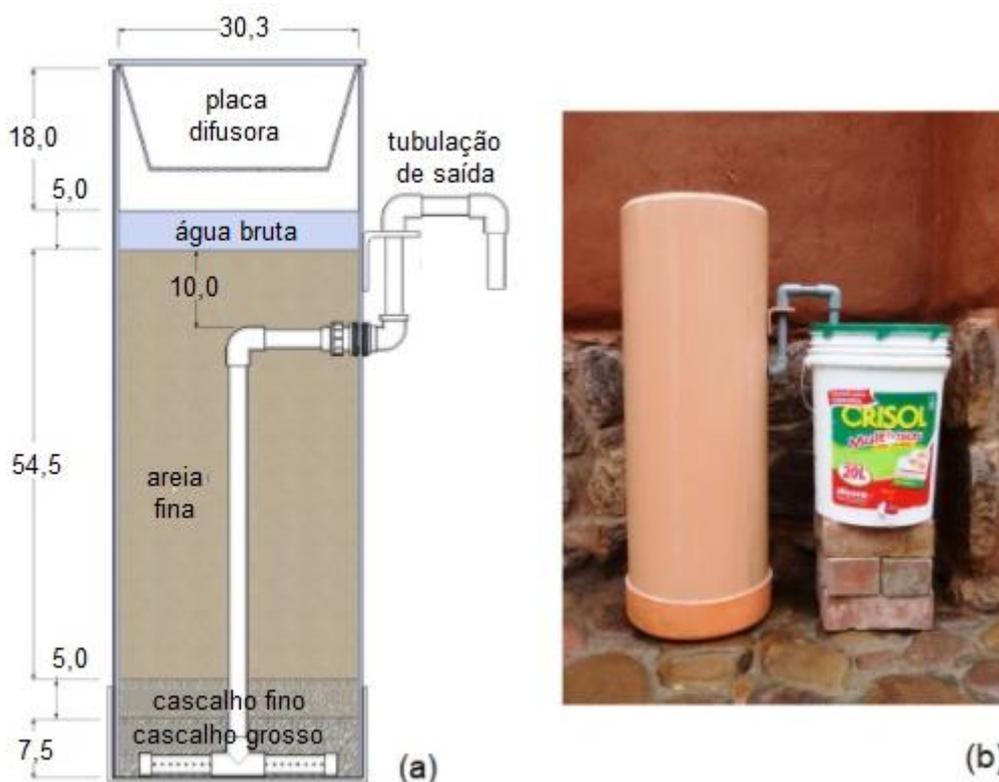


Figura 3.9: (a) esquema do biofiltro de DESEA Peru (2017) (medidas em cm); (b) foto do filtro instalado.

Os biofiltros de DESEA Peru (2017) possuem área em planta de 0,072 m², sendo 22% mais largos que os filtros da CAWST (2009), e operam em regime intermitente com taxa de filtração variável, com máxima de 0,4 m³/m²/h (9,6 m³/m²/d). A água tratada pelos biofiltros de PVC foi testada em laboratório e em campo em diferentes ocasiões (2011,

2013 e 2015), tendo apresentado eficiências similares ou superiores às dos filtros de concreto da CAWST (2009) (Tabela 3.4). Segundo o manual, a água produzida por esses biofiltros é apropriada para o consumo humano, uma vez que atende ao padrão bacteriológico de qualidade da água recomendado pelo Ministério da Saúde peruano (menos de 1 CFU/100mL de água, para coliformes totais e *E. coli*).

Tabela 3.4: Eficiência do biofiltro desenvolvido por DESEA Peru (2017)

	Bactéria	Vírus	Protozoários	Helmintos	Turbidez	Ferro
Em laboratório	<98,5%	70-99%	>99,9%	~100%	95% (<1 uT)	N.A.
Em campo	87,9-98,5%	N.A.	N.A.	~100%	85%	90-95%

Tradução livre de DESEA Peru (2017). *N.A. = dados não apresentados

Elliot *et al.* (2006) também realizaram experimentos em biofiltros de plástico e de concreto, utilizando, em ambos, o mesmo meio filtrante. Observaram eficiências de remoção de *E. coli* menores no biofiltro de concreto (89,2% nos primeiros 30 dias de operação e 95,6% a partir do dia 31) do que no biofiltro de plástico (95% nos primeiros 30 dias e 99,5% nos dias subsequentes). Também se constataram remoções mais baixas para indicadores de vírus (MS2, PRD-1 e *echovirus* 12) no filtro de concreto relativamente ao de plástico. De acordo com os autores, uma possível explicação para esses dados seja o pH mais elevado encontrado na água filtrada do filtro de concreto (de até 9,3) em comparação aos filtros de plástico (de até 8,2), devido à lixiviação de cal do concreto, principalmente no início da carreira de filtração.

Além da redução do peso e do ligeiro aumento na eficiência dos biofiltros, outras vantagens do emprego do PVC na fabricação de FLAs são a sua durabilidade e acessibilidade. Há, inclusive, a possibilidade de utilização - ou mesmo de reutilização - de bombonas ou reservatórios disponíveis localmente, para montagem do filtro ou como reservatório da água filtrada. Na instalação dos biofiltros no Peru, por exemplo, foram reutilizados recipientes de óleo de cozinha para armazenamento da água tratada (Figura 3.9 b). Segundo os autores, há ampla disponibilidade local dessas embalagens plásticas, que são duráveis, de baixo custo e seguras do ponto de vista sanitário (DESEA Peru, 2017).

Outro exemplo da utilização de materiais acessíveis e emprego da mão de obra local para confecção do filtro lento de areia são as experiências da EMATER/MG (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais), que tem levado a tecnologia da filtração lenta para produtores rurais de agricultura familiar no interior de Minas Gerais, no Brasil. Encontra-se disponibilizado gratuitamente no *site* da empresa dois documentos (Leal *et al.*, 2013 e Leal, 2016), direcionados aos produtores, com informações e recomendações de boas práticas ambientais a serem adotadas nas propriedades rurais. Em ambos os documentos, há a menção e o esquema simplificado de um sistema de filtração lenta para tratamento de água, de âmbito domiciliar, com dimensão suficiente para produção de água para todos os usos da propriedade rural e que pode ser adaptado à realidade dos usuários (Figura 3.10). Os documentos não contêm informações a respeito dos parâmetros de projeto a serem aplicados, como a taxa de filtração ou a granulometria do meio filtrante, porém a EMATER/MG presta auxílio aos produtores que demonstrem interesse nesses filtros para a sua construção e implantação.



Figura 3.10: Esquema genérico do interior do filtro lento ilustrado pela EMATER-MG (Leal, 2016)

De fato, o sistema parece ter sido implantado em algumas propriedades rurais, como na do produtor rural Ricardo Reghin, entrevistado pelo programa Balanço do Campo, da Rede Mais HD - Record TV. Segundo o engenheiro da EMATER-MG entrevistado, Reis

(2019), a filtração ocorre em um tambor de plástico reaproveitado de 200 L (anteriormente utilizado para reservar azeítonas), preenchido com brita e areia, que ocupam aproximadamente $\frac{2}{3}$ do volume do reservatório e atuam como meio filtrante. A água bruta é bombeada da mina para o filtro e a água filtrada é então reservada em outro tambor de menor capacidade, cujo volume não foi especificado (Figura 3.11), de onde pode ser coletada e consumida. Segundo o usuário entrevistado, o sistema encontrava-se em operação há 3 anos na data da reportagem, e a água filtrada era utilizada para todos os usos da residência (não foi citado o volume de água filtrada produzido diariamente). Antes da implantação do sistema, a família buscava água do brejo ou da mina, sendo que ambas apresentavam presença de coliformes fecais, conforme reportado por Reis (2019).



Figura 3.11: Sistema de filtração lenta em residência de produtor rural adaptada de Leal *et al.* (2013). Direito de imagem: Rubens Xavier.

Ressalta-se que os eventuais custos vinculados à obtenção dos materiais necessários para a construção desses filtros são do produtor rural. Entretanto, de acordo com o engenheiro e o produtor rural entrevistados, o sistema é acessível, uma vez que conta com materiais de fácil acesso, que podem ser adquiridos em mercados e/ou lojas de materiais de construção, por preços exequíveis, ou até mesmo encontrados na própria propriedade do produtor interessado (como os reservatórios plásticos e a areia e a brita). Ademais, a mão

de obra para confecção do filtro é a do próprio usuário, que, segundo o engenheiro entrevistado, recebe o projeto sem custos da EMATER/MG e é instruído por técnico ou engenheiro da empresa na instalação do sistema.

De maneira similar, outra ação inspirada nos documentos da EMATER/MG supracitados foi a implantação de unidade de filtração lenta de areia, em 2016, em uma agroindústria de produção de queijo, localizada em comunidade rural em Berizal/MG, conforme contato por e-mail com o responsável técnico pelo projeto em questão, Rubem Almeida. O intuito do projeto era aprimorar a qualidade do queijo produzido, a partir da melhora da qualidade da água utilizada na produção, responsável pela renda dos agricultores familiares da comunidade. A água utilizada anteriormente provinha de nascente localizada a um quilômetro da sede da fazenda, que se apresentava incolor e inodora, porém após intervenção da EMATER/MG, percebeu-se que a qualidade microbiológica da água não atendia aos critérios de potabilidade para consumo humano.

Assim, foi instalado, na propriedade, filtro lento de areia em uma bombona cilíndrica de polietileno de 240 litros, com dimensões de 1,06 m de altura e 0,59 m de largura. Como meio filtrante, empregou-se 0,10 m de pedra rolada; 0,15 m de brita 1; 0,15 m de brita 0; e 0,18 m de areia lavada. Foi recomendado aos usuários que utilizassem cloração posteriormente ao tratamento pelo filtro lento, no entanto, isso não foi concretizado até o momento em que houve acompanhamento pela EMATER/MG.

Outro projeto que trouxe acesso ao sistema de filtração lenta para populações em áreas rurais brasileiras é o Projeto Sanear Amazônia, que constituía parte integrante do Programa Cisternas (Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água) do Governo Federal. Segundo Bernardes *et al.* (2018), esse é um projeto que vinha sendo colocado em prática desde 2007, tendo beneficiado mais de 3.000 famílias em diferentes estados da Região Amazônica, com unidades filtrantes que ainda se encontravam em pleno funcionamento na data de publicação do artigo.

O projeto em questão envolveu ainda a construção de banheiros, fossas e filtros lentos pela própria comunidade, sob a orientação de profissionais técnicos competentes, porém no presente trabalho, o foco será dado ao filtro lento de areia implementado (Figura 3.12),

para atendimento das demandas de toda a comunidade, com a determinação de moradores da liderança local como agentes responsáveis pela operação e manutenção do filtro e demais sistemas. Mais aspectos construtivos da tecnologia empregada podem ser encontrados em documento específico produzido pela Secretaria Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional do Ministério da Cidadania - SESAN/MDS (2016).

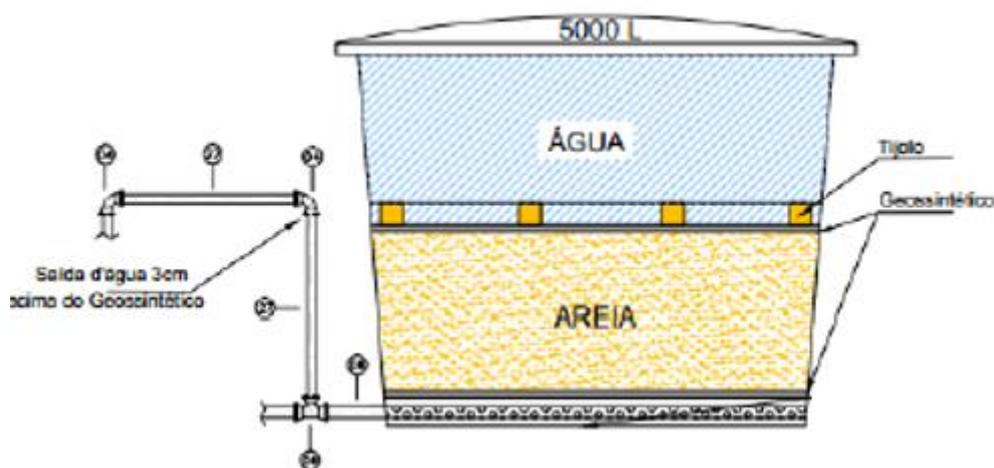


Figura 3.12: Esquema do FLA comunitário - Projeto Sanear Amazônia (SESAN/MDS, 2016)

Durante a maior parte do ano (7 a 8 meses), o filtro em questão trata água pluvial captada dos telhados das residências e armazenada em cisternas. Nos períodos de estiagem, no entanto, o filtro opera com água de outra fonte que esteja disponível à comunidade. Esse é um aspecto interessante do projeto, uma vez que os mecanismos biológicos de remoção de impurezas, relevantes nos filtros lentos de areia, podem ser afetados pela variação da qualidade e composição da água bruta, sendo que é recomendável que se mantenha o abastecimento sempre com a mesma fonte de água. Em comunicação pessoal com prof. Dr. Ricardo Bernardes (um dos idealizadores do projeto), foi levantado esse tema, e segundo ele, a qualidade microbiológica da água era afetada por aproximadamente uma semana seguida à mudança da fonte de água bruta, sendo que a eficiência voltava ao esperado após esse período.

Outro elemento interessante do projeto é a utilização de geossintético - ou manta sintética - sobre o meio filtrante (Figura 3.12), que visa preservar a areia, aumentando a duração da carreira de filtração e, conseqüentemente, postergando o momento da limpeza (vide item 3.4). Observa-se ainda a tubulação de saída de água acima da cota do geotêxtil, de

forma a manter o meio filtrante submerso e, assim, proteger a *schmutzdecke*. Além disso, nesse projeto, foi adicionada manta sintética também abaixo do meio filtrante e acima da camada suporte, com o objetivo de evitar a obstrução da tubulação de saída da água filtrada, de acordo com Bernardes (comunicação pessoal, agosto de 2021).

Bernardes *et al.* (2018) ressaltam, ainda, uma questão importante do ponto de vista social desse projeto, comum a várias comunidades rurais, que é a melhora na qualidade de vida da população, especialmente de mulheres e crianças, ocasionada pela implantação do projeto Sanear Amazônia. Isso porque, nessas áreas isoladas, incumbe-se, na grande maioria das vezes, às mulheres a tarefa de obter água para os diversos usos domiciliares (Funasa, 2019).

Isso também foi reportado pelas próprias usuárias dos sistemas implantados no Médio Juruá, no Amazonas, em documentário patrocinado pela Petrobrás e executado pela Associação dos Produtores Rurais de Carauari, sob a coordenação do Prof. Dr. Ricardo Silveira Bernardes e da Dra. Carolina Bernardes (Iaccovazo, 2013). Uma evidência disso é que, em algumas regiões, observou-se um “aumento de 25% de crianças nas escolas”, conforme mencionado no documentário.

De forma geral, a partir da revisão da literatura, percebe-se que a utilização do biofiltro permite o emprego de material local, além da participação da comunidade na sua implementação, o que favorece a apropriação da tecnologia pelos usuários e a sua consequente sustentabilidade a médio e longo prazos.

3.4. TRATAMENTO MULTI-BARREIRA

Apesar de os filtros lentos de areia garantirem uma remoção elevada de impurezas e patógenos em uma etapa única de tratamento (vide Tabela 3.1), é recomendável que sejam tomados alguns cuidados com a água bruta (antes da filtração) e que seja feita a desinfecção da água filtrada (após a filtração), no que é conhecido como abordagem multi-barreira, uma vez que cada etapa no processo do tratamento da água, desde a fonte até a reserva segura da água tratada, promove uma redução adicional de riscos à saúde humana (CAWST, 2009).

Assim sendo, para um tratamento mais completo da água visando a garantia da qualidade microbiológica da água para consumo humano, mantendo-se ainda a simplicidade e a acessibilidade do sistema, as seguintes etapas podem compor o tratamento multi-barreira (CAWST, 2012) (Figura 3.13):

1. Clarificação por sedimentação da água bruta;
2. Filtração (biofiltro);
3. Desinfecção da água filtrada; e
4. Armazenamento seguro da água tratada.

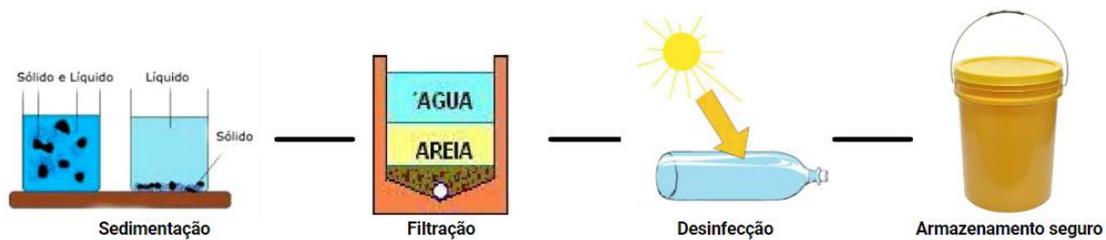


Figura 3.13: Abordagem mutli-barreira para o tratamento com biofiltros

A sedimentação se apresenta, nesse contexto, como etapa de pré-tratamento à filtração lenta. A sedimentação é um processo físico de remoção de partículas (sólidos em suspensão), que se movem em direção descendente, pela ação da gravidade, propiciando a clarificação da água, com a separação das fases líquida e sólida (Di Bernardo *et al.*, 2017). O tempo de sedimentação depende do tamanho e da densidade das partículas, que determinam sua velocidade de sedimentação, além da profundidade útil do recipiente utilizado (Di Bernardo *et al.*, 2017).

Além da clarificação por sedimentação, uma alternativa tecnológica é o uso da pré-filtração dinâmica e em pedregulhos, o que, seguido da filtração lenta, constitui a filtração em múltiplas etapas (FiME), para a qual recomenda-se o livro de Di Bernardo *et al.* (1999), que trata especificamente dessa tecnologia e de suas variantes destinada ao tratamento de águas, produto de pesquisas colaborativas do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB.

Contudo, para o uso domiciliar na zona rural, pode ser mais apropriado o uso da sedimentação ou de algum tipo de peneiramento (CAWST, 2009), uma vez que estes processos não demandam aquisição contínua de produtos químicos ou uso de energia

elétrica. O uso de material tecido como coador apresenta como desvantagem a possibilidade de contaminação microbiológica da água caso o tecido utilizado não esteja limpo o suficiente.

Assim, a sedimentação é sempre recomendável, porém deve ser utilizada especialmente quando a água bruta possuir turbidez maior do que 10 uT, uma vez que a presença de sólidos em altas concentrações na água alimentada ao filtro lento de areia pode prejudicar a sua operação e a sua eficiência, conforme comentado anteriormente (Di Bernardo, 1993; Di Bernardo *et al.*, 1999; Castaño *et al.*, 1999; Logsdon, 2008). A sedimentação é especialmente necessária quando a água apresenta turbidez acima de 50 uT (Di Bernardo *et al.*, 1999; CAWST, 2009).

Para determinar a necessidade da sedimentação quando não estiverem disponíveis testes laboratoriais mais sofisticados, CAWST (2012) sugere um procedimento simples que pode ser feito em qualquer localidade, pelos próprios usuários. O método consiste no posicionamento de uma garrafa PET incolor contendo 2 litros da água a ser avaliada por sobre um logotipo ou alguma superfície estampada. Se for possível enxergar o logotipo ou estampa ao olhar do topo da garrafa, então a água pode ser utilizada para abastecer o filtro lento (pois provavelmente sua turbidez está abaixo de 50 uT), caso contrário, considera-se indispensável a etapa de pré-tratamento.

Entretanto, se a água estiver demasiadamente turva, ao ponto de estar completamente opaca, pode haver a necessidade de outro tipo de pré-tratamento ou de coagulação/floculação precedendo a sedimentação, o que é feito mediante adição de produtos químicos (coagulantes e auxiliares de floculação) na água, que deve ser submetida à agitação com gradiente específico de velocidade (Di Bernardo *et al.*, 2017). Nesse caso, pode se tornar inviável o uso da filtração lenta para o tratamento dessa água no âmbito domiciliar em áreas rurais, sendo então necessário considerar outras fontes de água bruta ou analisar a viabilidade do uso de outras tecnologias de tratamento de água.

Ressalta-se que esse processo de verificação da turbidez da água de alimentação do filtro lento de areia deve ser feito frequentemente, já que a estação do ano, a pluviosidade, o lançamento de resíduos no corpo d'água e outros fatores podem afetar significativamente a qualidade da água bruta na fonte, alterando a concentração de sólidos e,

consequentemente, a necessidade do uso da sedimentação precedendo a filtração lenta.

Destaca-se ainda a impossibilidade do uso da filtração lenta para tratar águas salobras ou águas doces com elevada cor verdadeira, conforme discutido anteriormente.

Na sequência, após a sedimentação, a água pré-tratada é então alimentada ao filtro lento de areia ou ao biofiltro. Nesse ponto, a água deve ser conduzida cuidadosamente do recipiente onde ocorreu a sedimentação para a unidade de filtração, de forma a evitar a ressuspensão dos sólidos sedimentados. Os sólidos retidos no fundo do recipiente devem ser descartados, evitando-se o contato humano, já que podem estar contaminados com micro-organismos patogênicos.

A filtração lenta é, então, responsável pela remoção de partículas de diâmetro reduzido, da ordem de micrometros, sendo capaz de remover mais de 90% dos patógenos, através de mecanismos biológicos e físico-químicos, conforme mencionado anteriormente.

Após a filtração lenta, é recomendável, ainda, a desinfecção, de forma a garantir a melhor qualidade possível da água em termos microbiológicos (Gucchi *et al.*, 2014; CAWST, 2009; Funasa, 2019). Destaca-se o papel da desinfecção especialmente no que diz respeito à remoção de vírus e de outros micro-organismos de tamanho reduzido que porventura não sejam removidos nas etapas prévias. Apesar de existirem diversos métodos para a desinfecção da água, os mais comuns e apropriados ao uso domiciliar em áreas rurais são: a desinfecção solar (SODIS); a cloração; e a fervura da água.

A desinfecção solar (SODIS) baseia-se no uso de recipientes translúcidos de plástico ou de vidro que, quando expostos à radiação solar, possibilitam a desinfecção da água, mediante ação combinada da radiação ultravioleta, calor e atividades oxidativas com o oxigênio dissolvido (WHO, 2017). Recomenda-se um tempo de exposição de 2 a 5 horas, sendo que a presença de nuvens e neblina pode interferir na eficiência da desinfecção (Di Bernardo *et al.*, 1999).

Verifica-se que a SODIS se trata de uma tecnologia de baixo custo, uma vez que se baseia na ação do sol, “fonte natural, universalmente disponível e gratuita” (Di Bernardo *et al.*, 1999), em que são necessárias apenas garrafas PET ou outro recipiente. No entanto,

constata-se que, ao serem utilizadas garrafas PET de 1 ou 2 litros (tamanhos mais comuns no mercado), seriam necessárias, por exemplo, de 10 a 20 garrafas por dia para a produção de apenas 20 litros de água desinfetada (Sobsey *et al.*, 2008). Essa limitação gera a necessidade de planejamento prévio segundo às demandas a serem atendidas, além do manejo de vários recipientes diariamente, o que pode ocasionar o consumo da água pelos usuários sem passar por esse processo. Ademais, garrafas utilizadas por longos períodos podem se tornar opacas devido a arranhões e escoriações, e, portanto, inadequadas, devendo ser substituídas. Além disso, o fato de não haver mudanças significativas no sabor, no cheiro e na aparência da água antes e depois da desinfecção solar pode levar à descontinuidade do uso desse método pelos usuários, por acharem que o sistema não é eficaz (Sobsey *et al.*, 2008).

Já a cloração após a filtração lenta constitui uma combinação eficiente para o tratamento de água para consumo humano (Heller e Pádua, 2010). Segundo a Embrapa (2014), as maiores vantagens da desinfecção através da cloração são o baixo custo e a segurança microbiológica conferida à água, desde que o cloro seja devidamente dosado e esteja dentro do prazo de validade.

Além da aquisição frequente de insumo (cloro), que pode não estar à venda em local acessível próximo às áreas rurais, outra desvantagem da desinfecção com cloro é o sabor desagradável que pode ficar na água após a cloração. Ferreira *et al.* (2014) observaram, em seu trabalho de campo com visitas a uma comunidade quilombola no município de Mundaú, Alagoas, que muitas famílias (não foi relatado no trabalho quantitativo mais específico) não estavam utilizando o cloro, na forma de hipoclorito de sódio, devido ao gosto desagradável da água clorada.

Assim, políticas públicas de desinfecção por cloração têm sido fomentadas, em âmbito nacional, de forma que a Embrapa (2014) recomenda o uso do cloro granulado (hipoclorito de cálcio 65%), que pode ser encontrado em lojas de materiais para piscinas, por não ocasionar variação no sabor da água. É sugerida a adição de 1 colher rasa de café (2 mL) do cloro (hipoclorito de cálcio 65%) a cada 1.000 litros de água ou proporção equivalente (Embrapa, 2014). Todavia, para pequena escala, como no caso dos biofiltros, que comumente produzem menos de 100 litros por dia, pode ser dificultada a mensuração por essa proporção sugerida pela Embrapa (2014). Assim, o Ministério da Saúde (MS,

2014) recomenda o uso de hipoclorito de sódio 2,5%, na proporção de 2 gotas para cada litro de água ou 1 colher de chá de cloro para cada 20 litros de água. Pode-se utilizar água sanitária, desde que tenha registro no MS e contenha apenas hipoclorito de sódio e água (MS, 2014).

Finalmente, a fervura é o método preferencial sugerido pelo Ministério da Saúde (MS, 2014) para a desinfecção da água para consumo humano, sendo capaz de “eliminar bactérias, vírus e parasitas”. Além disso, não há a geração de efeitos residuais ou de subprodutos na água por esse método de desinfecção. Entretanto, há que se levar em conta a necessidade de maiores precauções relativamente aos recipientes utilizados para a fervura da água e para o armazenamento da água tratada, evitando-se assim recontaminação da água. Segundo a cartilha do MS (2014), a água deve ser fervida por 5 minutos antes de ser consumida.

Dessa forma, a definição do método de desinfecção deve levar em conta: a disponibilidade de insumos (cloro, no caso da cloração; insolação local e garrafas PET, para o SODIS; gás de cozinha ou outro meio para fervura da água); o tempo necessário para a desinfecção por cada processo; e adequação à realidade local dos usuários do sistema.

Por fim, o último passo do tratamento multi-barreira é o armazenamento seguro da água, etapa que não deve ser subestimada, uma vez que a recontaminação da água tratada em âmbito domiciliar é um gargalo comum desse processo, já reportado em vários estudos (CAWST, 2009; Liang *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2014). Desse modo, destacam-se aqui os cuidados para com o manejo e com o armazenamento da água tratada (CAWST, 2009):

- Utilizar recipientes limpos e bem tampados para armazenagem da água tratada;
- Utilizar os recipientes de água tratada apenas para água tratada, não misturando com os recipientes de coleta de água bruta;
- Evitar colocar as mãos, utensílios ou tecidos diretamente na água tratada (o ideal é que os recipientes de água tratada permitam a retirada de água através de tubulação de saída ou de torneira acoplada ou que a água seja retirada entornando-se o recipiente e deixando a água escorrer deles em vez de retirar a água de dentro com algum objeto ou com as mãos);

- Lavar os recipientes de água tratada frequentemente com sabão e/ou cloro;
- Durante a armazenagem, manter os recipientes de água tratada em local acima do chão em base firme e estável, dentro da residência, protegido da insolação e do alcance de crianças pequenas e de animais.

Em síntese, a abordagem multi-barreira pode, portanto, favorecer a própria eficiência dos biofiltros, com um pré-tratamento adequado à água de abastecimento dos filtros, e pode ainda aprimorar a qualidade da água filtrada, a partir da desinfecção. Já o armazenamento seguro da água tratada garante a manutenção da qualidade da água para consumo humano, conforme supramencionado. Assim sendo, cada etapa é fundamental e promove uma redução adicional do risco microbiológico, conforme explicado por CAWST (2009).

3.5. MANTAS SINTÉTICAS NA FILTRAÇÃO LENTA

A utilização das mantas sintéticas na filtração lenta tem sido estudada por vários fatores. O primeiro deles está relacionado aos gastos com a reposição da areia retirada no momento da limpeza, o que constitui parcela significativa dos custos operacionais dessa tecnologia, os quais podem ser reduzidos com a utilização de mantas sintéticas. É sabido, conforme discutido anteriormente, que a remoção das impurezas, na filtração lenta, ocorre predominantemente nos primeiros centímetros do meio filtrante. Assim, a manta adicionada sobre o meio filtrante objetiva exercer esse papel de retenção primordial das impurezas, concentrando os processos de purificação nos interstícios desse material. Isso poupa, portanto, a areia da perda de carga cumulativa e da colmatação atreladas à filtração (Mbwette *et al.*, 1990).

Por conseguinte, com o emprego das mantas sintéticas, a limpeza convencional (mediante a remoção dos primeiros centímetros do meio filtrante) é substituída pela retirada e lavagem da manta sintética, da mesma forma como se lavam roupas à mão. Teoricamente, esse é um processo mais simples, uma vez que os materiais dessas mantas não possuem grupos polares, o que favorece a sua limpeza (Di Bernardo, 1993). No entanto, algum cuidado deve ser tomado com relação às facilidades agregadas pela manta sintética, já que, na prática, pode haver dificuldades apreciáveis em sua remoção, manuseio e limpeza (Mbwette e Graham, 1987).

Outro possível benefício é o aumento da carreira de filtração, uma vez que o desenvolvimento da perda de carga nas mantas sintéticas é mais demorado do que na areia, o que torna a frequência da limpeza ainda menor do que no filtro lento convencional (Mbwette *et al.*, 1990; Di Bernardo, 1993). Logo, a utilização de mantas sintéticas pode potencializar duas vantagens intrínsecas da filtração lenta: os reduzidos custos e a simplicidade operacional.

Ademais, as mantas sintéticas têm a capacidade de amenizar os efeitos de variações sazonais na qualidade da água bruta, que podem acarretar picos de impurezas durante algumas épocas do ano (Paterniani e Conceição, 2004). Isso é um ganho para a filtração lenta, pois esses picos de impurezas reduzem substancialmente as carreiras de filtração, ocasionando, por conseguinte, a necessidade de limpezas mais frequentes (Paterniani e Conceição, 2004).

Outras vantagens listadas por Di Bernardo (1993) são: maior resistência à abrasão, ao calor, à radiação ultravioleta e ao ataque de compostos, como ácidos, alcalinizantes e agentes oxidantes; maior eficiência na remoção de impurezas; possibilidade de aplicação de taxas de filtração mais elevadas ou espessuras reduzidas do meio filtrante.

As mantas sintéticas podem ser divididas em mantas tecidas e não-tecidas, sendo que as primeiras possuem estrutura com entrelaçamento dos fios formando um ângulo próximo de 90°, enquanto as mantas não-tecidas são “constituídas de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direccionalmente ou ao acaso”, possuindo estrutura plana, flexível e porosa (Figura 3.14) (ABINT, 2017).

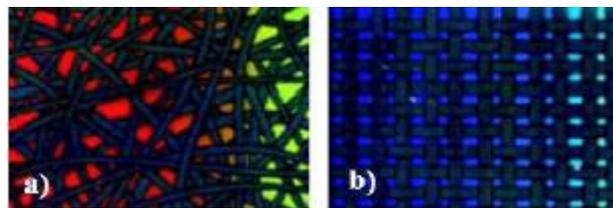


Figura 3.14: Detalhe das estruturas dos fios nas (a) mantas não-tecidas e (b) mantas tecidas (ABINT, 2017)

Segundo Mbwette e Graham (1987), as mantas sintéticas tecidas, em geral, possuem espaçamentos muito finos (menores do que 1 mm), o que as tornam impróprias para aplicação na filtração lenta. Além disso, as mantas tecidas apresentam eficiência de remoção de

impurezas inferior às mantas não-tecidas, mais comumente utilizadas na filtração. Siwila e Brink (2019) fizeram testes, em filtros lentos de areia em escala de bancada, e observaram que o uso da manta não-tecida geotêxtil favoreceu a qualidade da água filtrada em termos de turbidez (com residuais abaixo de 1 uT), enquanto o emprego da manta tecida de algodão escovado somente proporcionou valores residuais de turbidez próximos de 5 uT. Além disso, em termos bacteriológicos, o uso da manta de algodão não ocasionou redução significativa de coliformes fecais e *E. coli*, enquanto a manta geotêxtil avaliada propiciou remoções de até 95% de ambos os parâmetros.

Assim, considera-se que as mantas não-tecidas são mais adequadas para aplicação na filtração lenta e, portanto, estas serão detalhadas nesta revisão da literatura. De forma geral, as mantas sintéticas não-tecidas são constituídas por fibras de poliéster, poliamida, propileno, polietileno ou polivinilas (Mbwette e Graham, 1987; Di Bernardo, 1993), podendo ser produzidas a partir de um desses polímeros ou de alguma combinação entre eles.

Para ótimo desempenho dos filtros lentos, deve ser feita criteriosa seleção das propriedades das mantas sintéticas utilizadas, especialmente da permeabilidade (resistência ao fluxo de água) e da filtrabilidade (capacidade de reter partículas afluentes), de acordo com Mbwette e Graham (1987). Ambas as propriedades são dependentes das características estruturais das mantas escolhidas, principalmente da porosidade, do diâmetro médio das fibras e da área superficial específica. A Tabela 3.5 mostra como essas propriedades interagem entre si, numericamente, dando bases para a análise teórica das características das mantas sintéticas que possam ser mais vantajosas para a filtração.

Observa-se, que, numericamente (e sem levar em conta os aspectos biológicos da filtração lenta), a filtrabilidade das mantas sintéticas é afetada pela área superficial específica de forma diretamente proporcional. Além disso, a otimização da permeabilidade da manta sintética está atrelada à maior porosidade e à menor taxa de perda de carga.

Segundo Mbwette e Graham (1987), para que as mantas sejam efetivas em proteger o meio filtrante, elas devem possuir espessura e área superficial específica igual ou maior à da areia ativa. Isso porque, teoricamente, a otimização da filtrabilidade (diretamente proporcional à área superficial específica) e da espessura das mantas resultam em melhor eficiência na retenção de partículas. Tal fato se explica devido ao maior contato entre as

impurezas e as fibras das mantas não-tecidas para ambas as propriedades (elevada área superficial específica e elevada espessura).

Tabela 3.5: Propriedades das mantas (adaptado de Di Bernardo e Dantas, 2005)

Propriedade	Equação	Onde:
Porosidade	$\varepsilon_0 = \left(1 - \frac{g}{e \cdot \rho_f}\right)$	ε_0 : porosidade da manta; g: gramatura (g/m^2); e: espessura (m); ρ_f : massa específica do fio (g/cm^3).
Massa específica	$\rho_{fm} = \frac{(P_1 \rho_{f1} + P_2 \rho_{f2} + \dots + P_i \rho_{fi})}{100}$	P_i : porcentagem dos diferentes materiais da manta; ρ_{fi} : massa específica das fibras (g/cm^3).
Diâmetro médio das fibras	$\varnothing_f = \sqrt{\frac{400 \cdot D_{\text{tex}}}{\pi \cdot \rho_f}}$	\varnothing_f : diâmetro médio das fibras (m); D_{tex} : diâmetro dos fios fornecido pelo fabricante; ρ_f : massa específica do fio (g/cm^3).
Área superficial específica	$S_0 = \frac{(1 - \varepsilon_0) \cdot A}{\varnothing_{mf}}$	S_0 : superfície específica da manta (m^2/m^3); ε_0 : porosidade da manta; \varnothing_{mf} : diâmetro médio das fibras (m).
Filtrabilidade	$\lambda_0 = \frac{n_f \cdot \alpha_{fp} \cdot S_0}{\pi}$	λ_0 : coeficiente de filtrabilidade para a manta limpa (m^{-1}); n_f : eficiência da coleta de uma fibra; α_{fp} : coeficiente de aderência entre a partícula e a fibra da manta; S_0 : área superficial específica (m^2/m^3).

Porém, em termos da duração da carreira de filtração, de acordo com Graham *et al.* (1991), o melhor é associar baixa área superficial específica à alta porosidade das mantas sintéticas. Por outro lado, nesta situação, há elevada passagem de impurezas e maior aprofundamento de partículas na areia, de forma que a perda de carga ocorre majoritariamente na areia (Graham *et al.*, 1991), em oposição ao que se espera quando se empregam as mantas sintéticas.

A carreira de filtração também é afetada pela espessura da manta sintética utilizada, de forma que quanto maior a espessura, mais longa é a carreira de filtração (Graham *et al.*, 1991; Di Bernardo *et al.*, 1991). Além disso, conforme mencionado, a maior espessura das mantas sintéticas favorece a eficiência da filtração lenta.

Em busca de um compromisso entre carreira de filtração e eficiência, podem-se empregar várias camadas de mantas sintéticas (elevando-se a espessura total correspondente às mantas) que tenham área superficial específica menor, o que, segundo Mbwette e Graham

(1987), garante retenção considerável de sólidos. Contudo, espessuras muito elevadas para as mantas sintéticas não são recomendadas, uma vez sua remoção no momento da limpeza pode ser dificultada (Graham *et al.*, 1991).

Por outro lado, mantas sintéticas com espessuras muito reduzidas (menores do que 1 mm) não melhoram a eficiência dos filtros lentos, mesmo que a área superficial específica seja elevada (Mbwette *et al.*, 1990). Isso porque, apesar de favorecer a retenção de impurezas, mantas com área superficial específica muito elevada acarretam também um aumento excessivo da perda de carga, mesmo que a espessura seja reduzida (de 1 mm, por exemplo), o que pode prejudicar a carreira de filtração (Graham *et al.*, 1991).

A Tabela 3.6 apresenta os valores recomendados pela literatura para as principais propriedades da manta não-tecida para aplicação na filtração lenta.

Tabela 3.6: Propriedades das mantas recomendadas para uso na filtração lenta

Propriedades	Valores recomendados	
	Mbwette e Graham, 1987	Di Bernardo e Dantas, 2005
Espessura (mm)	0,30 - 20	0,04 - 20
Porosidade (%)	70 - 99	50 - 99
Área superficial (m ² /m ³)	10.000 - 40.000	1.100 - 36.000
Massa específica (g/cm ³)	0,005 - 0,40	0,02 - 0,40
Diâmetro médio das fibras (µm)	---	25 - 100
Condutividade hidráulica (mm/s)	---	0,25 - 47

Mbwette *et al.* (1990) conduziram um estudo com três filtros lentos de areia em escala piloto, em Londres, operando com taxa de filtração de 3,6 m³/m²/d (0,15 m³/m²/h), com duas mantas sintéticas não-tecidas diferentes, cujas especificidades estão apresentadas na Tabela 3.7.

O estudo de Mbwette *et al.* (1990) foi realizado em três fases, com diferentes combinações entre as mantas sintéticas avaliadas. Os autores observaram que, de maneira geral, as mantas sintéticas foram eficazes em proteger o meio filtrante, contendo o desenvolvimento da perda de carga total, conforme esperado. Conseqüentemente, as carreiras de filtração das unidades filtrantes com mantas sintéticas foram mais longas (em aproximadamente 4,5 dias) do que as da unidade convencional (sem manta), inclusive em

eventos de picos de impurezas. A partir desses resultados, é possível inferir que, mantendo-se carreiras de filtração viáveis, pode-se optar pela redução da espessura do meio filtrante de areia ou, ainda, pela elevação da taxa de filtração, o que ocasionaria redução de custos em ambas as situações (Mbwette *et al.*, 1990).

Tabela 3.7: Caracterização das mantas sintéticas utilizadas por Mbwette *et al.* (1990)

Propriedades	M1	M2
Composição	Polipropileno	Poliéster/Poliamida/PVC
Diâmetro médio das fibras (μm)	33	50/40/40
Espessura (mm)	4,8	14
Porosidade (%)	89	98
Área superficial (m^2/m^3)	13.266	1.671
Diâmetro dos discos (mm)	250	250

Com relação à eficiência, os filtros lentos com mantas sintéticas adicionadas apresentaram residuais médios de turbidez entre 0,1 e 0,3 uT, com máximo de 0,6 uT, e pelo menos 99% de redução de coliformes (Mbwette *et al.*, 1990). Quanto à limpeza das mantas sintéticas, que foi feita através de lavagem com água sob alta pressão, observou-se que a manta M2 era mais fácil de lavar, apesar de sua maior deterioração com as repetidas lavagens.

Tendo em vista os resultados positivos prévios com o uso de mantas sintéticas na filtração lenta, Luxton e Graham (1998) avaliaram o desempenho de mantas naturais, confeccionadas de fibras vegetais de juta, coco, abacá, sisal e linho, com o mesmo propósito. Parte dos testes foram realizados em laboratório e outra parte em filtros lentos em escala piloto, no Reino Unido, com água filtrada previamente por filtros de pedregulho de fluxo ascendente.

As mantas naturais foram confeccionadas de forma a atingir valores teóricos de filtrabilidade comparáveis aos das mantas sintéticas (Luxton e Graham, 1998). Porém, os autores observaram que, para fibras naturais, esses valores podem ser inconsistentes e/ou variáveis. Isso porque pequenas mudanças no diâmetro das fibras, ocasionadas pelo próprio processo de confecção ou pela degradação pelos microrganismos presentes nos filtros lentos, geram efeito considerável nos valores calculados de porosidade e área

superficial específica. Além disso, as fibras naturais, quando submersas, absorvem água, podendo aumentar seu volume em até 20%. Assim sendo, as propriedades das mantas naturais obtidas através de cálculos e experimentos devem ser consideradas de forma cautelosa. A Tabela 3.8 apresenta as propriedades das mantas utilizadas pelos autores.

Tabela 3.8: Propriedades das mantas naturais usadas por Luxton e Graham (1998)

Propriedades	Poli-propileno	Juta 1	Juta 2	Abacá	Sisal	Linho
Espessura (mm)	4,8	5,5	5,5	7	6	5
Densidade da manta (kg/m ³)	100	142	147	100	150	170
Densidade da fibra (kg/m ³)	910	1440	1440	1450	1450	1540
Diâmetro médio da fibra (µm)	35	50	50	280	200	40
Porosidade (%)	89,0	90,1	89,8	93,1	89,7	89,0
Área superficial específica (m ² /m ³)	12.559	7.889	8.167	985	2.069	11.039

Após a realização de testes de eficiência, biodegradabilidade e permeabilidade das diversas mantas em escala laboratorial, a manta de juta foi considerada a manta natural mais promissora. Constatou-se que esta manta possui filtrabilidade similar à da areia e permeabilidade consideravelmente maior (fator de 2-3), o que a tornaria adequada quanto aos requerimentos para utilização na filtração lenta.

Assim, Luxton e Graham (1998) conduziram experimentos em filtros lentos em escala piloto, em duas fases. Na primeira fase, três unidades filtrantes foram colocadas em operação, com taxa de filtração de 0,1 m³/m²/h (2,4 m³/m²/d), todas com meio filtrante de 0,3 m de areia: uma unidade de referência, sem manta adicionada; uma com 4 camadas da manta de abacá (espessura total de 28 mm) sobre a areia; e uma com 4 camadas da manta de juta 1 (espessura total de 22 mm). Enquanto a manta de abacá apresentou baixa filtrabilidade e inabilidade de proteger a areia, gerando uma carreira de filtração de 42 dias, o filtro com a manta de juta obteve carreira de filtração similar à do filtro de referência (115 dias). Além disso, observou-se que a comunidade biológica se desenvolveu mais rapidamente na manta de juta do que na areia. Quanto à eficiência, o

filtro com manta de juta obteve eficiência similar à do filtro de referência, com níveis de turbidez consistentemente abaixo de 0,5 uT, e residual de coliformes totais de <3 NMP/100mL (sendo que a entrada era de <80 NMP/100 mL).

Na segunda fase dos experimentos em escala piloto, os autores avaliaram, a uma taxa de 0,2 m/h, a utilização de uma camada de manta de fibra de coco (espessura de 10 mm) sobre as 4 camadas de mantas de juta 2 (espessura total de 20 mm). Isso porque a fibra de coco se mostrou, em escala laboratorial, mais resistente às demais mantas naturais, apesar de, sozinha, não ter sido considerada própria para utilização na filtração lenta. Enquanto o filtro de referência apresentou uma carreira de filtração de 28 dias, o filtro com as mantas naturais operou por 58 dias, de tal forma que toda a perda de carga se concentrou nas mantas naturais e não houve quase nenhuma deposição de partículas na areia. Além disso, observou-se que a microbiota se concentrou de fato na camada da manta de fibra de coco, que foi eficiente em proteger as mantas de juta. A eficiência de ambos os filtros foi, mais uma vez, similar, com residuais de coliformes totais de 50 a 200 NMP/100 mL (a água de alimentação possuía concentrações de 500 a 1.000 NMP/100 mL).

Apesar de o estudo ter sido realizado em clima mais frio que o Brasil, as mantas naturais, especialmente as mantas de juta combinadas com a manta de fibra de coco, parecem apresentar potencial para emprego na filtração lenta. Face aos resultados obtidos, a utilização das mantas naturais parece ser uma eficiente forma de utilização de materiais e mão-de-obra locais, o que ocasionaria desoneração do tratamento e engajamento da comunidade.

Santos (2015) conduziu experimentos em um sistema de filtração em escala piloto, em Campinas/SP, composto por uma unidade de pré-filtração ascendente, seguida por dois filtros lentos operando em paralelo. Um dos filtros lentos era composto exclusivamente por mantas não-tecidas (propriedades detalhadas na Tabela 3.9), sendo que foram testadas diferentes espessuras do meio filtrante. O outro filtro, de controle, possuía meio filtrante convencional, constituído de 0,80 m de espessura de areia. Todas as unidades filtrantes foram operadas com taxas de filtração de 3, 6 e 9 m/d (isto é, 0,125; 0,25 e 0,375 m/h), até que se atingisse a perda de carga máxima em várias carreiras de filtração.

Tabela 3.9: Caracterização da manta utilizada por Santos (2015)

Propriedades	Manta
Composição	Poliéster
Diâmetro dos fios (μm)	26,8
Espessura (mm)	4,0
Porosidade (%)	86
Área superficial (m^2/m^3)	20.896
Espessura do meio filtrante (m)	0,40
Número de discos	100
Diâmetro dos discos (mm)	250

O período de amadurecimento foi de 15 dias para ambos os filtros (de areia e de mantas). Como esperado, foram constatadas carreiras de filtração mais longas para os filtros de mantas (até 91 dias) em comparação aos filtros de areia (máximo de 42 dias), para todas as taxas de filtração, o que foi atribuído à elevada porosidade das mantas sintéticas em relação à areia. Consequentemente, foi reduzida a frequência de lavagem daqueles filtros em relação aos filtros de areia. Para a limpeza, a autora sugere a remoção de, pelo menos, 5 cm de manta.

Santos (2015) concluiu que, em termos de turbidez, um meio filtrante de 25 cm de espessura constituído exclusivamente de manta não-sintética tem potencial para substituir um filtro lento de areia com 50 cm de espessura, com eficiências similares, possibilitando, portanto, a construção de filtros com tamanhos reduzidos comparados aos filtros lentos tradicionais, o que reduziria custos de implantação e operação. Quanto aos parâmetros bacteriológicos (coliformes totais, *E. coli* e bactérias heterotróficas), os melhores resultados dos filtros de mantas foram obtidos pela espessura do meio filtrante de 10 cm associada à taxa de filtração de 3 m/d e pela espessura de 15 cm associada às taxas de filtração de 6 e 9 m/d. Estas combinações geraram desempenho semelhante ao do filtro de areia, nesse aspecto.

Sanín (2013) avaliou, na Colômbia, a aplicação de manta sintética não-tecida de poliéster (características na Tabela 3.10) na filtração lenta em duas situações: colocada sobre o meio filtrante de areia; e como substituta do meio filtrante. Assim, o experimento, realizado em escala piloto, contava com três unidades filtrantes: SF1, de controle, com

meio filtrante convencional de 90 cm de areia; SF2, com meio filtrante de areia idêntico ao anterior, porém com uma unidade de manta sintética adicionada sobre a areia; SF3, composto de 60 cm da manta, somente. Além disso, o estudo se desenvolveu em três etapas, com diferentes taxas de filtração, de 6, 9 e 12 m/d.

Tabela 3.10: Caracterização da manta utilizada por Sanín (2013)

Propriedades	Manta
Composição	Poliéster
Diâmetro dos fios (μm)	39,6
Espessura (mm)	20
Porosidade (%)	93
Área superficial (m^2/m^3)	7.071

Sanín (2013) constatou que o emprego da manta sintética estudada, em ambas as situações, levou ao aumento da eficiência do sistema, a carreiras de filtração mais longas e à possibilidade de redução do meio filtrante. De forma geral, os filtros lentos com mantas sintéticas (SF2 e SF3) foram mais eficientes na geração de água de qualidade em comparação ao filtro lento de areia convencional, em termos de turbidez, cor aparente, matéria orgânica e *E. coli*.

Ademais, as eficiências de SF2 e SF3 foram similares para todos os parâmetros, independentemente da taxa de filtração aplicada, exceto para turbidez, em que o filtro SF2 (areia + manta) foi mais eficiente. No aspecto econômico, o filtro SF3 (somente manta) apresentou custo um pouco mais elevado (6,6%) do que o SF2. Conclusivamente, o SF2 foi considerado o mais apropriado técnica e economicamente, gerando água com qualidade adequada (cor aparente abaixo de 15 uC e turbidez menor que 2 uT, em 95% das amostras analisadas), em conformidade com a norma local de potabilidade. Em termos de *E. coli*, os melhores resultados (média de remoção de 99,9% ou 3,1 log) também foram provenientes do SF2, quando operando com taxa de filtração de 6 m/d.

Almeida (2018) realizou ensaios com quatro filtros lentos de areia em escala piloto, utilizando duas mantas sintéticas diferentes (Tabela 3.11).

Tabela 3.11: Caracterização da manta utilizada por Almeida (2018)

Propriedades	M1	M2
Material	Polipropileno	Poliéster
Gramatura (g/m ²)	540	510
Espessura (mm)	4,2	4,1
Massa específica do fio (g/cm ³)	0,91	1,38
Diâmetro médio dos fios (µm)	33,04	22,53
Porosidade (%)	86	91
Área superficial (m ² /m ³)	17.107,3	16.505,5
Fornecedor	Ober	Bidim
Custo (R\$/m ²)	8,67	14,8

Almeida (2018) observou que ambas as mantas sintéticas desempenharam papel importante na remoção de microesferas (representativas de oocistos de *Cryptosporidium*), sendo que a manta M2 se mostrou ligeiramente mais eficaz. Também foram realizados testes com areia fina e grossa (com diâmetros efetivos de 0,27 e 0,51 mm, respectivamente) combinadas com as mantas e, apesar de a areia fina ter apresentado eficiência superior, a autora sugere que, em casos de impossibilidade de adequação da areia às recomendações da literatura, o emprego da manta pode ser um fator de relevância na remoção efetiva de partículas.

Percebe-se, portanto, no uso das mantas sintéticas em filtros lentos de areia, o potencial para ampliar o efeito dos mecanismos de purificação, facilitar a operação, reduzir custos e possibilitar a alteração de parâmetros de projeto, sem perdas significativas na eficiência do tratamento. Para uso em domicílios localizados em áreas rurais, constata-se, como principal vantagem do uso do geotêxtil, a maior facilidade de limpeza, particularmente em unidades pequenas, em que a manta sintética pode ser retirada e lavada em procedimento similar ao da lavagem de roupas.

Porém, observa-se que, apesar de alguns estudos já terem sido realizados nessa área, não há um consenso na literatura existente que permita a identificação da melhor combinação das propriedades das mantas sintéticas e composição dessas mantas que possam gerar os melhores resultados na aplicação em filtros lentos de areia. As recomendações sintetizadas por Mbwette e Graham (1987) e Di Bernardo e Dantas (2005) (Tabela 3.6) têm sido um guia para os demais estudos, porém ainda levam em conta uma faixa de valores ampla para cada parâmetro de caracterização das mantas.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho possui caráter majoritariamente qualitativo, sendo que a concepção do biofiltro aqui proposto parte de conhecimentos, conceitos, fundamentos e critérios advindos de revisão sistemática da literatura, com análise entre as diversas alternativas operacionais e de materiais que se têm acerca da filtração lenta atualmente.

Na revisão bibliográfica, foram consultados artigos científicos, livros, teses de doutorado, dissertações de mestrado, documentos de órgãos oficiais (como o Ministério da Saúde e a Organização Mundial da Saúde, por exemplo), além de documentos de entidades não-governamentais que se dedicam à ampliação do acesso ao saneamento básico, a partir do desenvolvimento de filtros lentos de areia domiciliares para comunidades rurais ou isoladas (tais como o *Centre for Affordable Water and Sanitation Technology* - CAWST - e o DESEA Peru). Ademais, levando-se em conta o objetivo do presente trabalho, foram considerados ainda vídeos encontrados na plataforma *YouTube*, de matérias jornalísticas e entrevistas a responsáveis técnicos e a moradores de áreas rurais acerca da filtração lenta e de sua aplicabilidade no cotidiano dessas pessoas.

Como critérios de busca de artigos científicos, foram utilizadas plataformas de busca de artigos científicos, tais como o Portal de Periódicos da Capes; a Jstor; a ProQuest; a Elsevier; a Science Direct. Nessas buscas, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: filtração lenta; filtração lenta de areia; biofiltração; tratamento de água para consumo humano; e correlatos. Para a seleção dos artigos científicos, foi dada preferência a documentos publicados recentemente (há 5 anos ou, no máximo 10 anos), porém também foram utilizados artigos científicos e periódicos mais antigos, dada a relevância do conteúdo e o fato de não ter sido encontrado algo similar em documentos mais recentes.

A partir da análise da bibliografia existente, procedeu-se à proposição do projeto de um biofiltro para tratamento de água para consumo humano apropriado e adaptável à realidade domiciliar em áreas rurais, com levantamento do material necessário à confecção dos filtros, com posterior orçamento das peças necessárias à instalação do sistema. Para as escolhas envolvendo a concepção e o dimensionamento do filtro proposto, foram considerados: a simplicidade de montagem, instalação, operação e

manutenção do sistema; a facilidade de obtenção dos materiais propostos; e os custos iniciais envolvidos com a aquisição de materiais.

Após o dimensionamento do biofiltro, passou-se ao detalhamento dos procedimentos para a tomada de decisão e dimensionamento, de modo a possibilitar a alteração de quaisquer parâmetros de projeto, como o número de moradores na residência ou para acomodar a utilização de materiais locais disponíveis, por exemplo.

Foram feitos, então, orçamentos dos materiais necessários para montagem do biofiltro, segundo as especificações e os parâmetros de projeto definidos. Os orçamentos foram feitos em lojas de materiais de construção, em reais (R\$), na Asa Norte em Brasília/DF, em setembro de 2022. Foram feitos três orçamentos e, dentre os valores levantados, foi calculada a média aritmética, para obtenção do custo médio da confecção do biofiltro. Ressalta-se, porém, o contexto dessa época, em que estavam presentes constantes variações na inflação, devidas à pandemia da Covid-19, proximidade das eleições presidenciais e guerra russo-ucraniana, fatores que contribuem para a incerteza da economia e flutuações nos preços em geral.

Por fim, o concatenamento das informações levantadas por meio da revisão bibliográfica, experiência com a proposição de sistema de filtração lenta e orçamentos realizados culminou na produção de cartilha (Anexo 2) sobre filtração lenta em linguagem simples e acessível. A produção da cartilha tem por objetivo promover acessibilidade da população a essa tecnologia em específico que tem potencial de ser aplicada em âmbito domiciliar, atendendo às demandas da população em zonas rurais, não contempladas por soluções centralizadas ou por iniciativas públicas ou privadas. Além disso, juntamente com a proposta de concepção do biofiltro, visa subsidiar propostas de políticas públicas, com vistas à universalização do acesso à água potável.

O formato de cartilha foi escolhido pois converge com o objetivo de informar e educar, a partir de exposição leve e dinâmica (Ribeiro e Queluci, 2021) sobre a filtração lenta. Além disso, acredita-se que a cartilha favorece a compreensão das informações pelo público-alvo, além da memorização das informações, se necessário. Para a construção da cartilha, seguiram-se os procedimentos sugeridos por Ribeiro e Queluci (2021).

Ressalta-se que este trabalho se encontra ancorado na proposta de gestão do PNSR, uma vez que objetiva contribuir para a discussão acerca de uma das tecnologias previstas na matriz tecnológica do referido Programa, resulta na formação formal de profissional técnico na área, e leva em conta a abordagem da gestão baseada no apoio do poder público enquanto promotor de saúde e de ações de saneamento básico.

Por fim, cabe destacar que o trabalho atual é uma adaptação da metodologia original, proposta em 2019, a qual se baseava na realização de análises laboratoriais, em escala piloto, a serem realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB). As atividades então propostas foram impossibilitadas de se concretizar, devido ao contexto pandêmico vivido nos anos de 2020 e 2021.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do levantamento bibliográfico e da sistematização das informações da literatura especializada, propõe-se, neste trabalho, a concepção e o dimensionamento de um biofiltro (filtro lento de areia para uso domiciliar) para o tratamento de água destinado ao atendimento das demandas básicas de uma família de até seis pessoas. Sendo assim, o biofiltro unifamiliar proposto se apresenta como solução individual, adequada principalmente para residências localizadas em áreas sem aglomerações, conforme preconizado pelo PNSR (Funasa, 2019). Ademais, conforme matriz tecnológica constante do PNSR, a filtração lenta, enquanto solução individual, somente é adequada quando presentes fontes de água doce advindas de mananciais superficiais, de aquíferos livres ou da chuva (Funasa, 2019). Outras limitações com relação às fontes de água para alimentação do biofiltro estão detalhadas no item 5.3.3 (Operação do biofiltro).

Reconhece-se que soluções tecnológicas que atendam a todas as demandas da residência pela água estão mais próximas do ideal, porém, para produção de volumes elevados, é inviabilizada a operação intermitente, sendo recomendada a operação contínua, por meio de bombeamento, o que demanda consumo continuado de energia elétrica, nem sempre disponível em zonas rurais localizadas em áreas sem aglomerações ou isoladas. No entanto, o biofiltro aqui apresentado – solução individual, de pequeno porte, para atender às demandas mais urgentes – constitui-se como uma alternativa de melhoria para situações e/ou localidades em que ainda não se fazem possíveis intervenções mais sofisticadas.

Entende-se, contudo, as limitações desse tipo de solução de pequeno porte, especialmente no que diz respeito à produção de água insuficiente para todos os usos pretendidos, o que pode prejudicar a continuidade do uso no longo prazo, conforme constatado na pesquisa de campo de Liang *et al.* (2010) em comunidades da Cambódia, onde biofiltros desse tipo foram instalados em domicílios rurais. Por outro lado, aspectos como a inserção de diálogos e de treinamentos a respeito de saúde pública, de higiene pessoal, da operação e manutenção dos biofiltros e do armazenamento seguro da água filtrada, além do engajamento dos usuários desde a tomada de decisão pela adoção da tecnologia até a instalação e a operação, são recomendados no processo de implantação dos biofiltros, de forma a evitar a descontinuidade do uso, a utilização de fontes de água menos seguras

e/ou a recontaminação da água filtrada, como observado nas experiências reportadas na literatura (Liang *et al.*, 2010; Bernardes *et al.*, 2018; Funasa, 2019).

Assim sendo, o biofiltro concebido neste trabalho não consiste necessariamente em um projeto acabado e definitivo, de forma que representa um ponto de partida apenas, uma proposta inicial para ser apresentada para e discutida com as famílias e/ou comunidades receptoras da tecnologia, como parte de um processo maior, que envolve outras etapas. Há ainda que se levar em conta a barreira existente entre os conhecimentos acadêmicos aqui desenvolvidos e os saberes das populações envolvidas, nesta primeira proposta, até então, feita com base unicamente nos conhecimentos sistematizados advindos da literatura. O biofiltro proposto deve, portanto, antes de implementado, ser submetido a testes para validação do seu comportamento hidráulico enquanto filtro lento de areia, da sua eficiência de remoção de impurezas e da sua simplicidade de instalação e de operação na prática.

Além disso, é sabido que há diversas realidades no Brasil, com comunidades diferentes, que possuem demandas variadas, de modo que o projeto proposto pode e deve ser adaptado, pelos responsáveis técnicos pela implementação do projeto no âmbito da proposta de gestão do PNSR, para cada família ou agrupamento de residências, a partir de diálogos e trocas de saberes com os interessados.

Nesse sentido, após apresentada a concepção do biofiltro proposto nos itens subsequentes, segue-se discussão a respeito do processo de implantação do biofiltro dentro de uma proposta de gestão amparada pelo Poder Público, incluindo-se aspectos relevantes à seleção do meio filtrante, à instalação, operação, limpeza e manutenção do biofiltro, além do armazenamento seguro da água filtrada, que podem servir de base para a equipe técnica responsável pelas etapas vindouras de implantação do projeto na prática.

Ressalta-se que, em conformidade com a proposta de gestão do PNSR, as etapas supervenientes à proposta de concepção deste trabalho devem ser conduzidas por equipes multidisciplinares (profissionais técnicos das áreas de engenharia, saúde, vigilância sanitária, comunicação, sociologia, antropologia, dentre outros especialistas) sob a égide do Poder Público, responsável por subsidiar, técnica, econômica e administrativamente, a implantação de serviços de saneamento básico para as populações, competência que

decorre da Constituição Federal (Brasil, 1988) e da Lei Federal nº. 11.445 (Brasil, 2007).

Ademais, em consonância com o PNSR (Funasa, 2019), rejeita-se o modelo de autogestão, em que as comunidades ou indivíduos assumem o papel – legalmente atribuído ao Poder Público – de provedores e gestores dos próprios serviços de saneamento básico.

5.1. CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO BIOFILTRO

Neste item, está apresentada a concepção de um biofiltro unifamiliar de baixo custo, que visa ao atendimento das demandas básicas das famílias atendidas, à exemplo de experiências como as da CAWST (2012), DESEA Peru (2017) e Liang *et al.* (2010). Assim sendo, o biofiltro é concebido para produção diária de 60 litros de água filtrada (60 L/d), atendendo assim a famílias com até seis pessoas, adotando-se consumo per capita de 10 L/hab.dia. Entende-se por demandas básicas as necessidades de hidratação, higiene das mãos em uso no preparo de alimentos, cujo volume recomendado é de 7,5 a 15 L/hab.dia (WHO, 2011).

De forma sucinta, a Tabela 5.1 mostra os parâmetros de projeto adotados e outros aspectos do biofiltro na concepção proposta, com as respectivas observações, nas quais constam as justificativas para os valores ou quesitos adotados e as referências bibliográficas que motivaram as tomadas de decisão. Na sequência, apresentam-se as discussões acerca de cada um desses aspectos, além de figuras esquemáticas do biofiltro proposto.

É indicado, como unidade de filtração, o uso de recipiente de PVC (policloreto de vinila), por ser um material leve e que não interfere na produção de água de qualidade (DESEA Peru, 2017). É possível reutilizar recipientes (bombonas, tanques, tambores, barris ou tonéis), que são comumente fabricados em PVC (Figura 5.1) e que podem estar disponíveis localmente, desde que atendam às especificações detalhadas a seguir. Entretanto, não devem, em qualquer hipótese, ser empregadas, para esta finalidade, embalagens de substâncias tóxicas, como de pesticidas e agrotóxicos.

Tabela 5.1: Parâmetros de projeto adotados para o biofiltro

Aspecto do biofiltro	Adotado	Observações
Unidade de filtração	Diâmetro: 30 cm	Levar em conta volume útil para água bruta dentro do filtro e estabilidade da estrutura
	Altura: 85 cm	Vide Tabela 5.2
	PVC, opaco, cilíndrico	DESEA Peru, 2017; Di Bernardo <i>et al.</i> , 1999
Vazão de projeto	60 L/dia	Levar em conta demanda dos usuários; Terin e Sabogal-Paz, 2018; Amui e Moruzi, 2016
Taxa de filtração	2,4 a 9,6 m ³ /m ² /d	CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017
	variável (declinante)	Elliot <i>et al.</i> , 2018; Terin e Sabogal-Paz, 2018
Altura do sobrenadante (N.A.)	5 cm	Elliot <i>et al.</i> , 2008; CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017
Meio filtrante (areia fina)	Espessura inicial: 0,5 cm	Elliot <i>et al.</i> , 2008; CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017
	Espessura mínima: 0,4 cm	
	Tamanho dos grãos: <0,7 mm	CAWST, 2009, 2012; Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017
	Diâmetro efetivo: 0,15 a 0,35 mm	Huisman e Wood, 1974; NBR ABNT 12.216/1992; Logsdon, 2008; Crittenden <i>et al.</i> , 2012; Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017
	Coefficiente de desuniformidade: 2,0 a 5,0	Castaño <i>et al.</i> , 1999; Di Bernardo <i>et al.</i> , 1999
Camada suporte	Camada de separação: 5 cm (pedregulho fino - 2 a 6 mm)	Vide Tabela 5.2 Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017
	Camada de drenagem: 5 cm (pedregulho médio - 6 a 12 mm)	
Regime de operação	Intermitente	CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017; Terin e Sabogal-Paz, 2018
Difusor	Localização do difusor: 7 a 10 cm acima do N.A.	CAWST, 2009
	Diâmetro dos orifícios: 2,0 a 3,0 mm	Elliot <i>et al.</i> , 2008; CAWST, 2009;
	Espaçamento entre orifícios: 2,0 e 2,5 cm	DESEA Peru, 2017



Figura 5.1: Exemplos de tanques de água que podem ser reutilizados (Fonte: MercadoLivre, 2023)

Também é possível a utilização de tubulações de PVC de diâmetro maior que 200 mm, geralmente usadas para redes de esgotamento sanitário, como feito no trabalho de Amui e Moruzzi (2016). Outros materiais que podem ser empregados para esta finalidade, em caso de maior disponibilidade local, são o concreto, a fibra de vidro, a argila ou a cerâmica (EMATER, 2013).

O recipiente escolhido deve possuir formato cilíndrico, de forma a garantir comportamento hidráulico próximo ao de fluxo pistão, minimizando as zonas mortas e curtos-circuitos, e deve ser necessariamente de material opaco, evitando, assim, o desenvolvimento de algas, que podem acarretar prejuízos à operação e à manutenção dos biofiltros (Di Bernardo *et al.*, 1999).

Quanto às dimensões da unidade de filtração, a área em planta e o diâmetro do biofiltro foram calculados para atender à vazão de projeto (60 L/dia), considerando-se a faixa da taxa de filtração adotada (mínima de 2,4 m³/m²/d e máxima de 9,6 m³/m²/d), o que resulta nos valores apontados ao final deste item, na Tabela 5.3 (vide Anexo 3 para os procedimentos e cálculos). Já a altura do biofiltro depende dos valores adotados para a altura de cada uma das camadas que o compõem, conforme se constata na e na Figura 5.2 e na Tabela 5.2, a qual mostra os valores observados nos biofiltros encontrados na literatura, juntamente com as funções de cada um desses componentes, justificando assim os valores adotados.

Tabela 5.2: Altura de cada camada no biofiltro recomendada e adotada (cm)

Camada	Função	Altura (cm)		
		Literatura	Referências	Adotada
Camada suporte	Evita obstruções da tubulação de saída	10 a 15*	CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017; Terin e Sabogal-Paz, 2018	10*
Meio filtrante	Retenção de impurezas	≥ 50	Elliot <i>et al.</i> , 2008; CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017	50
Nível de água acima do meio filtrante (N.A.)	Garante a manutenção da <i>schmutzdecke</i>	4 a 7	Elliot <i>et al.</i> , 2008; CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017	5
Reservatório interno	Volume ocupado pela água bruta de alimentação até que ocorra a filtração	-	-	20
TOTAL		-	-	85

*A camada suporte é dividida em pedregulho grosso e pedregulho médio (cada qual com altura recomendada de 5 a 7,5 cm) e deve cobrir totalmente a tubulação de saída da água filtrada. Caso isso não ocorra, deve ser adicionado mais pedregulho, até 15 cm no total (7,5 cm de cada), a fim de proteger essa tubulação.

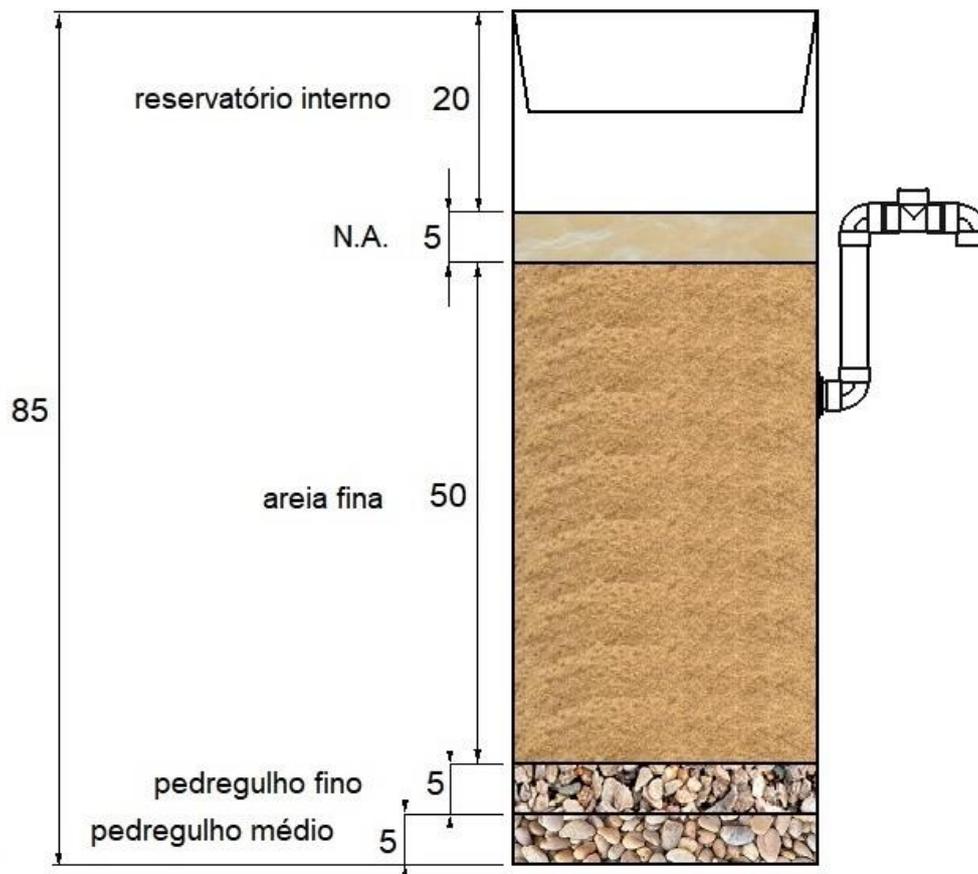


Figura 5.2: Alturas adotadas para cada camada do biofiltro (medidas em cm)

Cabe ressaltar que a determinação da altura do reservatório interno (juntamente com a adoção do diâmetro de 30 cm para o biofiltro) foi feita de forma a resultar em um volume útil de aproximadamente 15 litros para o reservatório de água bruta, para que, em regime intermitente, seja possível a produção desejada, de 60 L/dia, com quatro abastecimentos diários. O número de abastecimentos é importante na esfera domiciliar, pois afeta a dinâmica familiar, uma vez que gera uma demanda extra para os usuários, que devem interromper seus afazeres para reabastecer o biofiltro. Ressalta-se que esta não é a única configuração possível de operação, apesar de ser aquela que gera o menor custo para o biofiltro, de forma que outras opções são discutidas no item 5.3.3 (Operação do biofiltro).

Com relação à areia, constata-se a necessidade de 35 litros de areia fina, para atender à altura adotada de 50 cm (vide Anexo 3 para memorial de cálculo). Esse valor é consistente com o relatado na literatura para biofiltros de mesmo porte, como o da CAWST (2009) e da DESEA Peru (2017), que necessitam 39,2 e 30 litros de areia, respectivamente. Em termos de massa, esse volume equivale a 52,5 kg, considerando-se o peso específico aparente da areia seca com granulometria de até 1 mm igual a 1.500 kg/m³ (FGV, 2017).

Sugere-se que a areia fina e o pedregulho usados para o meio filtrante e para a camada suporte, respectivamente, sejam adquiridos de fornecedores especializados, capazes de prover estes materiais segundo as especificações sugeridas pela literatura, para o melhor desempenho do biofiltro. Assim, recomenda-se areia fina com granulometria menor do que 0,7 mm, diâmetro efetivo entre 0,15 e 0,35 mm e coeficiente de desuniformidade de 2,0 a 5,0 (vide Tabela 3.3 para as citações bibliográficas). Caso não seja possível atender a estes critérios, devido ao distanciamento e isolamento das residências ou comunidades atendidas em relação aos centros urbanos, pode ser utilizado solo arenoso proveniente de leitos de rios localizados nas proximidades. Porém, determinados procedimentos devem ser realizados para a correta seleção e preparação deste material, tornando-o adequado à filtração lenta, conforme explicitado no item 5.3.1.

Apesar de opcional, é indicado o emprego de material geotêxtil sobre a areia, de forma a facilitar a limpeza do biofiltro, a ser realizada pelos próprios usuários (Mbvette *et al.*, 1990; Di Bernardo, 1993). No item 5.3.4, encontram-se detalhados os procedimentos para a limpeza do biofiltro em caso de meio filtrante composto por areia+manta ou somente areia, o que, aliado aos custos e à disponibilidade local, pode auxiliar na tomada de

decisão a respeito da utilização desse material ou não. Além disso, o emprego das mantas sintéticas favorece a produção de água com melhor qualidade microbiológica e ameniza os picos de impurezas decorrentes da sazonalidade, conforme tratado no item 3.5 (MANTAS SINTÉTICAS NA FILTRAÇÃO LENTA).

Recomenda-se, para emprego no biofiltro, manta sintética não-tecida com aproximadamente 5 mm de espessura, porosidade entre 70 e 99%, massa específica entre 0,02 e 0,40 g/cm³ e área superficial de 10.000 a 36.000 m²/m³, segundo indicações da literatura (Mbwette e Graham, 1987; Di Bernardo e Dantas, 2005), especificações estas fornecidas pelo fabricante.

Para o meio suporte, pode-se utilizar pedregulho, cascalho ou brita. Para a determinação da granulometria do pedregulho a ser utilizado como meio suporte, adotaram-se as recomendações sugeridas para a filtração rápida (Di Bernardo *et al.*, 2017): o diâmetro do menor grão da camada inferior (aqui denominada camada de pedregulho grosso) deve ser de 2 a 3 vezes o diâmetro do orifício da tubulação de drenagem; e o diâmetro do menor grão da camada superior (aqui denominada camada de separação) deve ser 4 a 4,5 vezes o diâmetro efetivo da areia do meio filtrante.

Como demonstrado a seguir, a tubulação localizada no fundo do biofiltro deve possuir orifícios de 3 mm para a coleta da água filtrada. Assim, o pedregulho para a camada inferior deve possuir diâmetro de 6 a 9 mm. Já o pedregulho da camada de separação deve possuir diâmetro superior a 2 mm, tendo em vista o diâmetro efetivo recomendado para a areia do meio filtrante, de até 0,15 a 0,35 mm, consoante discutido no item 3.2 (PARÂMETROS DE PROJETO DE FILTROS LENTOS DE AREIA). Desse modo, pode ser empregado pedregulho com diâmetros variando entre 2 e 6 mm para a camada de separação.

Estima-se a necessidade de 3,5 litros de cada pedregulho, o que equivale a aproximadamente 6 kg de cada, considerando-se peso específico aparente do pedregulho de 1500 a 1800 kg/m³ (FGV, 2017) – vide Anexo 3 para memorial de cálculo.

Conforme discutido anteriormente (item 3.3 FILTRAÇÃO LENTA DOMICILIAR), o difusor – ou placa difusora – é um elemento comumente adicionado aos biofiltros (Elliot *et al.*, 2008; CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017; Terin e Sabogal-Paz, 2018),

devido ao regime de operação intermitente com alimentação manual de água bruta no filtro. O difusor visa à minimização de distúrbios na superfície do meio filtrante, onde se desenvolve a comunidade biológica mais proeminente no biofiltro (CAWST, 2009). Vários tipos de difusores podem ser confeccionados a partir de diversos materiais, a depender da disponibilidade local, como bacias de plástico, pastas escolares de plástico ondulado, placas metálicas ou acrílicas, dentre outros (Figura 5.3).

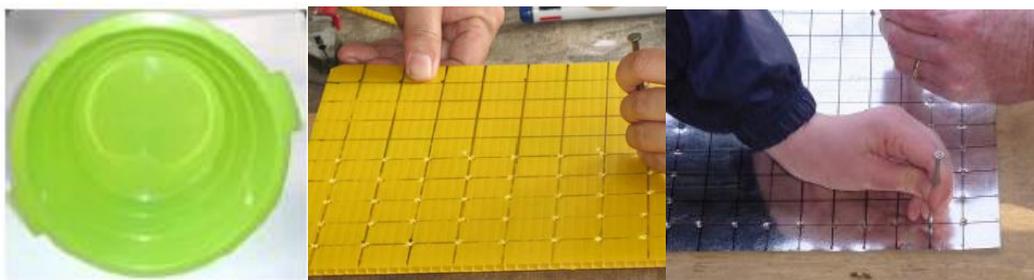


Figura 5.3: Exemplos de difusores para biofiltros: (a) bacia plástica perfurada utilizada como difusor por DESEA Peru (2017); (b) difusor feito com plástico ondulado de pastas escolares, por CAWST (2009); e (c) perfuração de placa metálica para uso como difusor, por CAWST (2009).

O difusor deve ser fixado a uma altura de 7 a 10 cm acima do topo do meio filtrante e deve seguir os seguintes padrões: diâmetro dos orifícios entre 2,0 e 3,0 mm; e espaçamento entre os orifícios entre 2,0 e 2,5 cm. Essa configuração sugerida baseia-se no adotado para biofiltros de porte similar (Elliot *et al.*, 2008; CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017). Ressalta-se que, segundo CAWST (2009), orifícios com diâmetros maiores podem ocasionar impacto da água de abastecimento no topo do meio filtrante, perturbando a *schmutzdecke*, enquanto orifícios menores podem restringir o fluxo de água excessivamente, podendo causar aumento do nível d'água até o transbordamento. Porém, a validação dessas proposições com o material selecionado e para as dimensões propostas para este biofiltro deve ser aferida por meio de protótipo a ser testado hidraulicamente.

Para que a água seja distribuída de forma homogênea sobre o meio filtrante, a distribuição dos orifícios deve ser homogênea e o diâmetro dos orifícios, invariável. Para tanto, sugere-se o procedimento ilustrado na Figura 5.3 (b) e (c). Ademais, o material utilizado como difusor deve ter um formato que se encaixe perfeitamente ao biofiltro, impedindo a percolação da água por caminhos alternativos aos orifícios (CAWST, 2009).

É fundamental que o biofiltro possua tampa, que pode ser confeccionada com diversos materiais, como plástico, madeira, cerâmica e metal, caso o recipiente escolhido para a unidade de filtração não possua tampa (CAWST, 2009; DESEA Peru, 2017).

Quanto à tubulação de coleta da água filtrada, ou simplesmente tubulação de saída, adota-se a configuração mostrada na Figura 5.4, cujo posicionamento adotado, similar ao do biofiltro da DESEA Peru (2017), se justifica devido à redução da exposição externa da tubulação, com conseqüente minimização do risco de danos; à menor pressão da água sobre o ponto de transpasse da tubulação pela lateral da unidade de filtração; e por facilitar eventuais reparos, uma vez que a maior parte dos encaixes e juntas ficam próximos à superfície. A tubulação que conduz a água filtrada pode ainda ser majoritariamente alocada fora da unidade de filtração, como no projeto Sanear Amazônia (SESAN/MDS, 2016) – vide Figura 3.12. Essa solução simplifica a reparação de eventuais vazamentos nas junções sem a necessidade de desmontar o filtro, porém expõe a tubulação a intempéries e eventuais acidentes.

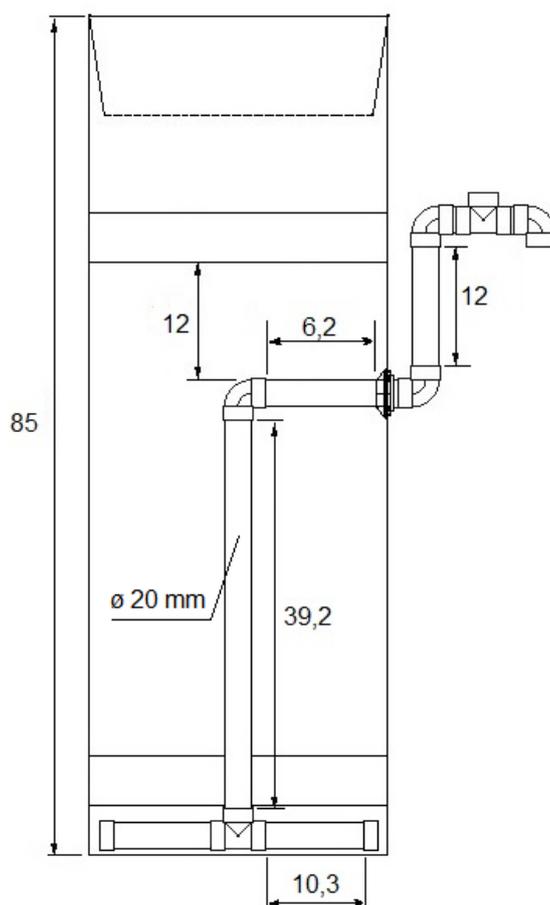


Figura 5.4: Posicionamento e dimensões da tubulação de saída (medidas em cm)

O sistema proposto é formado por tubos e conexões de ½” (20 mm) de diâmetro, todos de PVC soldável. Mais detalhes dos materiais necessários para o sistema de drenagem podem ser encontrados no item 5.2 (ORÇAMENTO DO BIOFILTRO PROPOSTO). Para propiciar a coleta da água filtrada, devem ser feitos orifícios na tubulação e nas junções posicionados na base do filtro. Sugere-se o uso de furadeira com broca de 3 mm para a perfuração dos orifícios, com espaçamento de 1 cm entre eles, de maneira similar aos projetos da DESEA Peru (2017) e CAWST (2009). Vide Figura 5.5 para detalhamento do posicionamento e das dimensões da tubulação de fundo. Caso seja necessário cortar alguma peça, pode ser necessário o uso de serra e de lixa para finalizar.

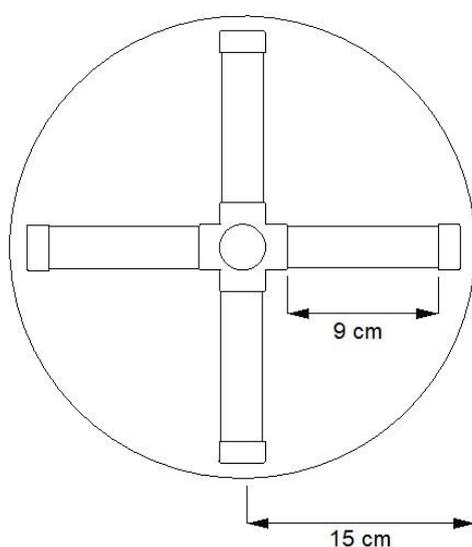


Figura 5.5: Detalhamento da tubulação de fundo (medidas em cm)

Ainda com relação ao posicionamento da tubulação de saída, destaca-se a altura de fixação da tubulação exterior ao filtro, determinante para a altura mínima do sobrenadante (N.A.) dentro do filtro, a qual deve ser de 5 cm, pelo menos (Elliot *et al.*, 2008; CAWST, 2009, 2012; DESEA Peru, 2017). A manutenção do N.A. dentro do filtro se dá devido ao princípio dos vasos comunicantes, em que ambas (coluna de água bruta sobrenadante dentro do filtro e água filtrada que percola a tubulação externa) estão submetidos à pressão atmosférica.

Alternativamente a essa configuração para a tubulação externa, pode-se prolongar a tubulação para acoplá-la ao reservatório de água filtrada – solução mais adequada do ponto de vista sanitário (Figura 5.6). Para tanto, pode ser feito um orifício, com o auxílio

de uma furadeira, de 20 mm na tampa do reservatório (ou de diâmetro similar ao da tubulação de saída do biofiltro), ao qual se conecta a tubulação, ajuste que pode ser garantido com a colocação de uma arruela de silicone em volta da tubulação, acima da abertura. Além disso, sugere-se a adição de um tê ou válvula de escape, visando assegurar a manutenção da pressão atmosférica, garantindo-se assim a manutenção do N.A. mínimo dentro do filtro.

Para o reservatório de água filtrada, podem ser utilizadas caixas de fibra de vidro, containers, bombonas, baldes, dentre outros, que suportem aproximadamente 20 litros de água. Além disso, o reservatório de água filtrada deve possuir tampa a fim de preservar a água filtrada. Na lateral do reservatório, próximo à base, recomenda-se a afixação de uma torneira, para retirada segura da água filtrada, o que pode ser feito através de um orifício de 16 mm na lateral do reservatório (ou de diâmetro idêntico ao da torneira escolhida) e com uso de selante de silicone nas juntas interna e externa da torneira. Para facilitar a retirada da água através da torneira, o reservatório de água filtrada pode ser posicionado sobre um banco ou blocos de cerâmica ou cimento, desde que firme e estável, a uma altura que fique confortável para os usuários (Figura 5.6).

Portanto, tomando como base os parâmetros de projeto observados nos filtros lentos de areia para uso domiciliar constantes da literatura (demonstrados nas Tabelas Tabela 5.1 Tabela 5.2), o biofiltro proposto resultou nas dimensões apresentadas na Tabela 5.3 e na **Error! Reference source not found.** Para procedimentos e cálculos realizados, vide Anexo 3.

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros de projeto do biofiltro

Parâmetros de projeto	Valor	Unidade
Nº pessoas na família	6	-
Produção diária	60	L/dia
Taxa de filtração máxima	0,4	m ³ /m ² /h
Espessura do meio filtrante (ha)	50	cm
Altura do biofiltro	85	cm
Diâmetro do biofiltro	30	cm
Volume do biofiltro	21,25	L
Área em planta	0,071	m ²

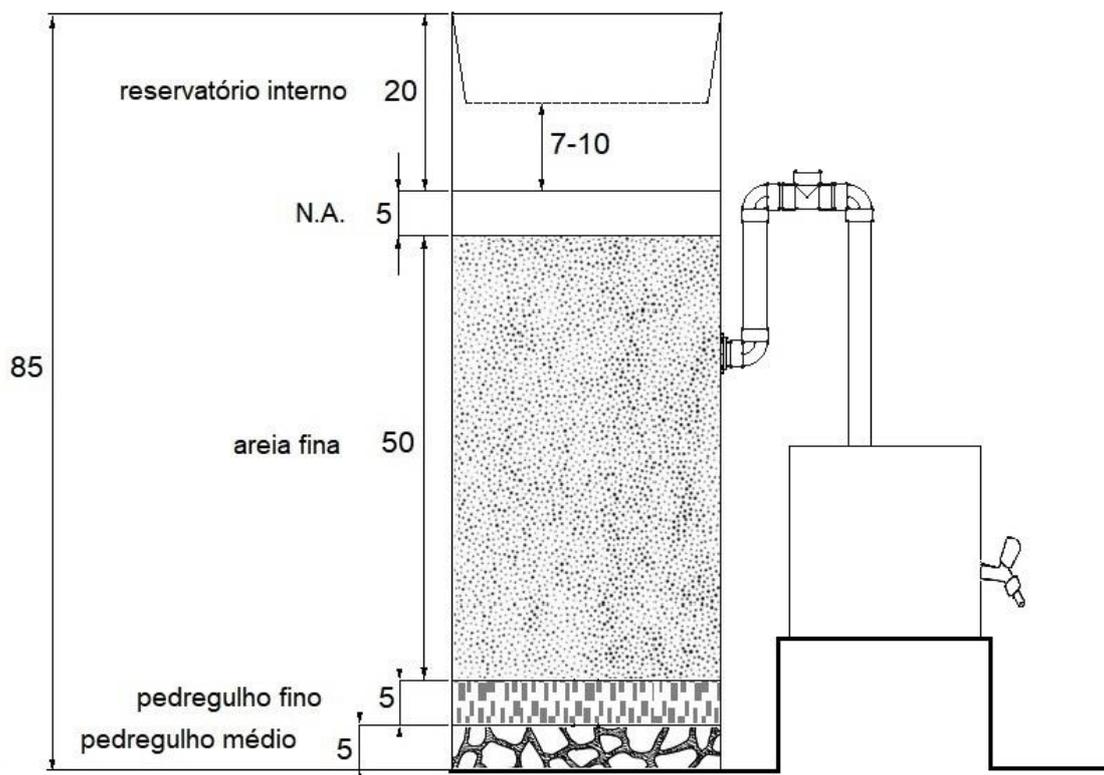


Figura 5.6: Biofiltro proposto (medidas em cm)

Resumidamente, o biofiltro concebido para produção diária de 60 L/dia deve ser constituído de PVC opaco, cilíndrico, com diâmetro de 30 cm e altura de 85 cm. Ademais, deve operar em regime intermitente, com quatro abastecimentos de 15 litros a cada 6 horas (Tabela 5.3). Essa forma de operação deve resultar em uma taxa de filtração variável (declinante), com máxima de $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ($9,6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$), o que equivale à produção de 0,5 L/min para as dimensões do biofiltro proposto, de forma que, no início da carreira de filtração, com o meio filtrante limpo, o biofiltro tem a capacidade de produzir até 0,5 litro de água filtrada a cada minuto. Mais detalhes e alternativas a essa forma de operação são tratados no item 5.3.3.

Ressalta-se que a concepção do biofiltro pode ser adaptada para diferentes dimensões e adoção de parâmetros de projeto diversos, caso se deseje uma produção diária maior ou menor ou se tenha recipiente a ser reutilizado com dimensões divergente daquelas previstas. No entanto, deve-se atentar às variações que tais mudanças podem acarretar as demais etapas, tais como a massa de pedregulho e de areia necessárias, dimensões da tubulação de saída, dentre outros.

5.2. ORÇAMENTO DO BIOFILTRO PROPOSTO

Conforme supramencionado, os custos aqui levantados se concentram majoritariamente na construção do biofiltro, já que após o investimento inicial, não é esperado que haja custos com a operação e a manutenção. Dessa forma, o presente trabalho se ateve ao orçamento referente à obtenção de materiais e à construção do biofiltro. A Tabela 5.4 apresenta os valores médios referentes aos orçamentos realizados. No Anexo 1, encontra-se tabela mais detalhada, com os custos de cada um dos três locais onde os produtos foram orçados, além de figuras de cada peça.

Tabela 5.4: Orçamento do biofiltro

Produto	Qtd.	Preço Unitário médio (R\$)	Preço Total
			(R\$)
Recipiente do biofiltro	1	69,95	69,95
Tubo ½"	1,5 m	5,83/metro	8,75
Cap 20 mm	4	1,96	7,84
Conector com 5 saídas 20 mm	1	10,08	10,08
Joelho 90°	4	1,15	4,60
Adaptador flange 20x1/2"	1	14,45	14,45
Adaptador soldável curto 20x1/2"	1	1,68	1,68
Vedante de silicone flexível	4	2,95	11,80
Suporte para tubulação exterior	1	2,80	2,80
Bacia de plástico de 30 cm de diâmetro (para difusor)	1	18,40	18,40
Balde de 20 litros (para reservatório de água filtrada)	1	27,93	27,93
Torneira	1	4,87	4,87
Cola PVC	1	3,33	3,33
Fita veda rosca	1	2,67	2,67
TOTAL	-	-	189,10

Destaca-se que não foram orçados os materiais de preenchimento do biofiltro (areia e pedregulho), que contribuem com um elevado percentual dos gastos para montagem do filtro em questão. No entanto, pode ser que, em zonas rurais, esses materiais estejam disponíveis localmente, na própria residência ou em corpos d'água superficiais próximos (possivelmente do mesmo corpo d'água de onde provém a água bruta a ser filtrada). De qualquer forma, essa é uma lacuna que pode ser explorada futuramente, especialmente no âmbito de implantação desses biofiltros com suporte do poder público.

Percebe-se, portanto, que a aquisição dos materiais necessários à confecção do biofiltro projetado resultou em um valor estimado de R\$ 189,10. Caso seja possível reaproveitar algum recipiente disponível localmente para o biofiltro, o custo cai para R\$ 119,15. Logo, verifica-se que o biofiltro proposto de fato possui custo inicial reduzido, sendo viável, especialmente no âmbito de políticas públicas na busca pela universalização do acesso à água de qualidade.

5.3. PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO DO BIOFILTRO

Conforme previamente mencionado, esta proposta inicial do biofiltro consiste apenas de uma primeira etapa, dentro de um processo maior de implantação da tecnologia. Assim sendo, reconhece-se a necessidade do desenvolvimento de um plano de trabalho, por pessoal técnico responsável, para a aplicação desta tecnologia na prática. Neste item, são discutidas, sem a pretensão de esgotar o assunto, etapas a serem desenvolvidas, no âmbito da gestão pública em conformidade com o PNSR, para a implementação dos biofiltros em domicílios localizados em áreas rurais.

Nesse sentido, segundo a Lei Federal nº. 11.445 (Brasil, 2007), regulamentada pelo Decreto Federal nº. 7.217 (Brasil, 2010), aos municípios – titulares legais dos serviços públicos – compete a gestão dos serviços de saneamento básico, a qual deve ser realizada com o apoio dos Estados e da União, uma vez que esta é uma competência comum a todos os entes federativos, os quais devem se articular na promoção do atendimento da população. Além disso, as ações de saneamento rural devem ser operacionalizadas em conjunto com atores locais, como lideranças comunitárias, e em articulação com representantes de órgãos governamentais e da sociedade civil organizada (Funasa, 2019).

A gestão do saneamento básico se compõe das etapas de planejamento (indelegável), regulação, prestação e fiscalização (delegáveis), segundo a Lei nº. 11.445 (Brasil, 2007). A etapa de planejamento é realizada pelos municípios, mediante instrumentos como a Política Municipal de Saneamento Básico e os planos municipais de saneamento básico (PMSB), os quais devem, em tese, contemplar o saneamento rural. A implantação de soluções coletivas ou individuais para as áreas rurais, como o biofiltro proposto neste trabalho, deve, portanto, ser prevista nesta etapa e executada no âmbito de políticas públicas que envolvam gestão multiescalar, com atuação da sociedade civil, nas escalas domiciliar e local (comunitária), e do Poder Público em todas as esferas (municipal, regional, estadual e federal), segundo as suas competências estabelecidas pela legislação supracitada e em conformidade com o estabelecido no PNSR (Funasa, 2019).

Assim sendo, seguem-se procedimentos a serem realizados para a validação da concepção proposta para o biofiltro e a posterior implantação em domicílios localizados em áreas rurais brasileiras.

1. Aquisição de materiais para confecção de protótipos, ainda no âmbito da continuidade desta pesquisa, por profissionais qualificados para realizar testes e avaliar os seguintes aspectos:
 - facilidade de obtenção das peças e atualização dos valores orçados;
 - relevância, precisão e simplicidade dos testes propostos no item 5.3.3 para a seleção do material filtrante adequado;
 - simplicidade de confecção do biofiltro proposto, levando em conta o ponto de vista dos usuários (pessoal não qualificado);
 - simplicidade e funcionalidade da configuração proposta para a tubulação de saída, checando-se a hermeticidade do sistema de drenagem e adicionando-se sugestões para a vedação do sistema, evitando-se problemas e vazamentos futuros.
2. Operação do protótipo do biofiltro em escala piloto, ainda no âmbito da continuidade desta pesquisa, por profissional técnico, observando-se, na prática:
 - validação da distribuição homogênea pelo difusor com o material proposto e com a distribuição dos orifícios sugerida, levando em conta o abastecimento manual pelos usuários;
 - validação do comportamento hidráulico próximo ao fluxo pistão e da taxa

- de filtração, por meio de traçadores, para garantir o comportamento do biofiltro concebido enquanto filtro lento de areia;
- validação do princípio de vasos comunicantes para a garantia do N.A., afastando a possibilidade de sifonamento;
 - simplicidade operacional;
 - simplicidade de limpeza;
 - avaliação da qualidade da água filtrada e eficiência do filtro.
3. Seleção de famílias domiciliadas em áreas rurais brasileiras para receber profissionais técnicos (engenheiros, técnicos, antropólogos, profissionais da comunicação e de saúde pública, dentre outros), com suporte dos municípios – titulares legais dos serviços de saneamento básico –, para diálogo e trocas de saberes, priorizando-se residências:
- localizadas em áreas sem aglomerações (conforme definição do PNSR), onde soluções coletivas sejam inviáveis e soluções individuais mais sofisticadas (para o atendimento de todas as demandas e uso de bombeamento), dificultadas;
 - não contempladas por serviços centralizados ou coletivos de saneamento básico nem por fornecimento de energia elétrica;
 - onde ainda prevaleça a autogestão dos serviços de saneamento básico, planejada e executada pelos próprios usuários, sem a intervenção ou apoio do Poder Público;
 - em que sejam utilizadas fontes de água bruta, sem tratamento, para as demandas básicas, assim consideradas a hidratação, higiene das mãos e preparo dos alimentos.
4. Avaliação da rotina e da realidade local, por profissionais (de saúde pública, antropólogos, engenheiros, dentre outros), incluindo-se aspectos como fontes de água disponíveis, condições climáticas e aspectos socioculturais, para adaptação do projeto à sua realidade e confecção do(s) primeiro(s) biofiltro(s) a ser(em) utilizado(s) na prática:
- Caso existentes, pode ser útil contar com o apoio de organizações comunitárias e lideranças locais, para incluir aspectos relativos às peculiaridades locais que envolva mais de uma residência local (Funasa, 2019).
5. Aquisição de peças hidráulicas e do meio filtrante, com suporte técnico e financeiro

do Poder Público (levando-se em conta as competências dos municípios, que são responsáveis pela organização e prestação dos serviços, e dos Estados e da União, enquanto agentes coordenadores e promotores de ações, de forma articulada e cooperativa com os municípios, especialmente quando estes não têm recursos financeiros e humanos suficientes para arcar com suas competências legais). Na escassez de recursos financeiros, sugere-se a aplicação dos testes propostos no item 5.3.3 para obtenção da areia e do pedregulho e conseqüente redução dos gastos.

6. Treinamento da mão de obra local ou dos próprios usuários sobre higiene pessoal, saneamento básico e instruções construtivas do biofiltro, seguindo as diretrizes a seguir:
 - linguagem simples e acessível (sugere-se o uso da cartilha - Anexo 2);
 - treinamento dinâmico, prático e objetivo;
 - criação de redes, canais, plataformas ou outro modelo de organização comunitária para compartilhamento de informações e de experiências entre os próprios usuários, mas que também envolva profissionais técnicos (Funasa, 2019);
 - capacitação de operador local (preferencialmente com formação educacional formal) para apoiar os usuários e operadores domiciliares durante a operação.
7. Acompanhamento para a confecção do(s) biofiltro(s), em trabalho conjunto entre a comunidade e os profissionais técnicos.
8. Início da operação do(s) biofiltro(s), com monitoramento contínuo e sistemático, para verificação do funcionamento dos biofiltros e de sua adequabilidade à rotina dos usuários, esclarecimento de dúvidas dos moradores, e coleta de amostras da água bruta e filtrada para exames laboratoriais de características físicas, químicas e biológicas de qualidade da água;
 - Ressalta-se a importância de se ter um operador local, qualificado e devidamente apoiado pelos gestores técnicos e administrativos do projeto, que esteja disponível e acessível localmente, para instruir e dar apoio aos usuários e operadores domiciliares, monitorar a eficiência dos biofiltros, executar ações preventivas e manutenções simples (Funasa, 2019).
9. Divulgação dos resultados obtidos para possível ampliação futura do projeto em políticas públicas, com conseqüente disseminação da tecnologia, levando água para mais famílias residentes em áreas rurais pelo país.

Constata-se, portanto, a necessidade de equipe multidisciplinar (composta por engenheiros, técnicos, sociólogos, antropólogos, profissionais da área de comunicação, de saúde pública, higienistas, dentre outros perfis profissionais), para o sucesso da proposta, que se concretizará na prática, com a validação do projeto e por meio de diálogos com as comunidades interessadas e muito trabalho para a confecção dos biofiltros concebidos, o que pode representar um importante passo a caminho da universalização do acesso à água de qualidade para comunidades rurais brasileiras.

5.3.1. Obtenção de areia e pedregulho

Conforme previamente discutido, é recomendado que este projeto seja implantado com o apoio financeiro e administrativo do Poder Público, que deve estar envolvido desde as etapas de planejamento até a execução e o monitoramento, em conformidade com o preconizado no PNSR (Funasa, 2019). Assim, para o meio filtrante (areia) e camada suporte (pedregulho), recomenda-se idealmente que estes materiais sejam adquiridos de fornecedores especializados, que sejam capazes de atender às especificações apontadas pela literatura (vide Tabela 3.3). No entanto, caso esta alternativa não esteja disponível, pode-se utilizar solo arenoso proveniente dos leitos de rios, após a realização de determinados procedimentos, os quais estão descritos neste item, para a escolha e a preparação da areia, tornando-a adequada ao uso enquanto meio filtrante do biofiltro.

Assim, entende-se que as características da areia utilizada como meio filtrante são determinantes para o funcionamento hidráulico do biofiltro e para a eficiência de remoção de impurezas e de patógenos, de forma que se recomenda que a escolha da areia seja feita por profissionais técnicos, como geólogos, geofísicos e engenheiros. Já o preparo desses materiais pode ser realizado pelos próprios usuários, em etapa posterior, a partir de treinamentos e supervisão técnica, no intuito de empregar mão de obra local, além de engajar e empoderar a comunidade local, o que pode ainda contribuir para a continuidade no uso da tecnologia a longo prazo (Liang *et al.*, 2010).

Conforme apontado anteriormente, são necessários 35 litros ou 52,5 kg de areia fina para o meio filtrante do biofiltro concebido, além de 3,5 litros ou 6 kg de cada pedregulho para as camadas de separação e suporte. Entretanto, ressalta-se que esses valores calculados

correspondem apenas ao material que atenda aos critérios supracitados e, portanto, caso não sejam adquiridos de fornecedores especializados, o volume total de areia e de pedregulho retirado de fontes alternativas (como de margens de rios) deve ser maior do que o valor aqui calculado, para que, após peneirada, haja resultante suficiente para o meio filtrante e para a camada suporte. Assim, destaca-se mais uma vez a relevância da seleção adequada da areia e do pedregulho, pois grandes volumes destes materiais devem ser transportados até o local de implantação, o que também gera demanda por recursos financeiros e humanos.

5.3.1.1. Seleção da areia

A seguir encontram-se alguns critérios e testes práticos que podem ser adotados em campo, para a determinação da adequabilidade da areia para uso como meio filtrante de filtros lentos. Para a seleção da areia e realização dos testes descritos nesse item, pode ser útil ter em mãos uma garrafa PET de 2 litros, uma agulha, uma caneta e um cronômetro ou relógio.

Assim, as primeiras características da areia a serem verificadas, a partir de uma primeira observação visual e tátil, em campo, são as seguintes (CAWST, 2009):

- Deve conter o mínimo possível de folhas, gravetos, grama, dentre outros;
- Deve ser possível enxergar cada grão de areia;
- Os grãos de areia devem ser de diferentes tamanhos e formatos;
- Deve ser possível sentir os grãos individualmente entre os dedos; e
- Não deve conter areia muito fina (semelhante a “pó” ou “poeira”).

Quanto à composição, a areia ideal para o biofiltro não deve conter argila e deve ser composta por uma fração mínima de silte, devendo ser majoritariamente arenosa (vide Figura 5.7 para percepção visual de cada uma dessas camadas).

Considerando a composição da areia, os testes visuais e tácteis descritos na Tabela 5.5 podem ser feitos em campo para definir se a areia é adequada ao biofiltro ou não, de acordo com a sua composição.



Figura 5.7: Diferentes camadas que compõem o solo (Adaptado de EducaCivil, 2020)

Tabela 5.5: Testes para determinação da adequabilidade de materiais arenosos ao biofiltro

Teste	Adequada ao biofiltro (solo arenoso)	Inadequada (solo com argila ou silte)
Apertar porção de areia seca na mão e em seguida abrir a mão	Toda a areia escorre suavemente por entre os dedos	Há a formação de amontoados “barrosos” ou dá a sensação de “grudar” nas mãos
Tentar fazer uma “bolinha” com a areia na mão	Não é possível fazer a “bolinha”; esfarela na mão	A “bolinha” não desmancha
Comprimir um pouco de areia úmida entre os dedos, observando se há a formação de “fio”	O “fio” não se forma	Há a formação de um “fio”
Pegar uma pequena porção da areia (do tamanho de uma ervilha) na palma da mão, umedecendo-a e espalhando-a, até que se forme um caldo cobrindo toda a palma da mão	Grãos permanecem totalmente separados e visíveis	Há aglomeração dos grãos
“Apertar” um pouco da areia entre os dedos próximo ao ouvido	Faz um “rangido”	Não faz barulho
Esfregar uma mão na outra com a areia entre as mãos	A sensação é áspera	A sensação é macia

Além desses, dois testes descritos a seguir podem ser feitos para garantia de que a areia é adequada ao biofiltro. O primeiro é o teste visual da composição da areia, que pode ser realizado em campo com o uso de uma garrafa PET de 2 litros ou outro recipiente de

material translúcido. Para tanto, preenche-se $\frac{2}{3}$ da garrafa PET com a areia e o restante, com água. Após agitá-la e deixá-la em repouso por alguns minutos, espera-se que ocorra a sedimentação dos grãos, o que pode permitir a percepção das frações que compõem a areia em questão - areia, silte e argila (Figura 5.8).

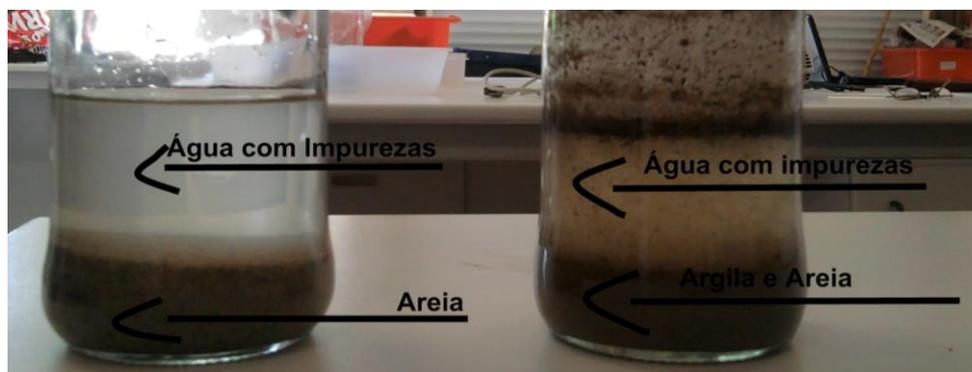


Figura 5.8: Teste visual da composição da areia

O segundo teste avalia a taxa de filtração indiretamente, através da vazão, e pode ser realizado a partir da confecção de um “filtro” em pequena escala, também dentro de uma garrafa PET de 2 litros ou outro recipiente de material translúcido, a partir do procedimento a seguir.

- Perfurar o fundo da garrafa com uma agulha;
- Preencher $\frac{2}{3}$ da garrafa com a areia;
- Introduzir 1 litro de água pelo topo da garrafa;
- Cronometrar o tempo necessário (em minutos) para a saída de toda a água;
- Calcular a vazão, em L/min, que deve ser de até 0,5 L/min.

Caso a areia atenda aos aspectos detalhados, é provável que ela seja adequada e possa ser empregada no biofiltro. De toda forma, cabe destacar que o ideal é a aquisição da areia de fornecedores especializados ou que sejam feitos os exames laboratoriais da areia selecionada por técnico habilitado. Contudo, sabe-se que esses recursos nem sempre estarão disponíveis na zona rural ou em tempo hábil, de forma que os testes aqui previstos são apenas um guia para a escolha consciente de uma areia que possivelmente atenderá aos requisitos para a adequada operação do biofiltro. Nesse caso, recomenda-se que a avaliação da adequabilidade da areia seja conduzida por profissional qualificado e experiente na área, o que aumenta consideravelmente a probabilidade de acerto na

definição da areia.

5.3.1.2. Preparação da areia e do pedregulho

A preparação do material consiste na lavagem e na desinfecção, seguidas do peneiramento para separação das granulometrias (areia fina, pedregulho fino e pedregulho médio). As primeiras duas etapas objetivam a remoção de materiais orgânicos (folhas, pedaços de madeira, dentre outros) e de patógenos que porventura estejam presentes (devido a prévio contato com excretas animais e/ou humanas, por exemplo) (CAWST, 2009). Destaca-se que estes procedimentos podem ser realizados pelos próprios usuários ou por mão de obra local, sempre apoiados por suportes técnico e administrativo provenientes dos entes públicos.

Assim, podem ser necessários: água tratada, pás e baldes preferencialmente de cor clara de aproximadamente 40 cm de profundidade, para lavagem da areia; lona ou outro material impermeável, para secagem e desinfecção; peneiras de 0,7, 2, 6 e 12 mm, luvas e máscaras, para peneiramento do material. Em caso de indisponibilidade de água tratada para lavagem da areia, pode ser utilizada alternativamente água do próprio corpo d'água. No caso do emprego de água salgada ou salobra para a lavagem, faz-se necessária também a remoção da salinidade presente (CAWST, 2009).

A lavagem é realizada através da movimentação e fricção dos grãos dentro dos baldes, que devem ser preenchidos com $\frac{1}{4}$ de areia e o dobro de água, processo que deve ser repetido até que a água de lavagem dispensada esteja clara (vide Figura 5.9; CAWST, 2009). Segundo manual construtivo do biofiltro da CAWST (2009), a areia não deve ser lavada excessivamente, uma vez que isso pode dificultar o desenvolvimento posterior da *schmutzdecke* no biofiltro (Figura 5.9).

Após a lavagem, sugere-se que seja realizada a desinfecção do material, por meio de secagem completa ao sol ou de cloração. O primeiro é um método menos oneroso e que não carece de suprimentos externos, além de não deixar residuais na areia, apesar de ser menos eficiente. Para a completa secagem ao sol, utiliza-se algum material impermeável (uma lona, por exemplo) onde a areia deve ser espalhada em uma fina camada. Em épocas chuvosas, o procedimento pode ser realizado dentro de um silo ou local coberto, desde que arejado.

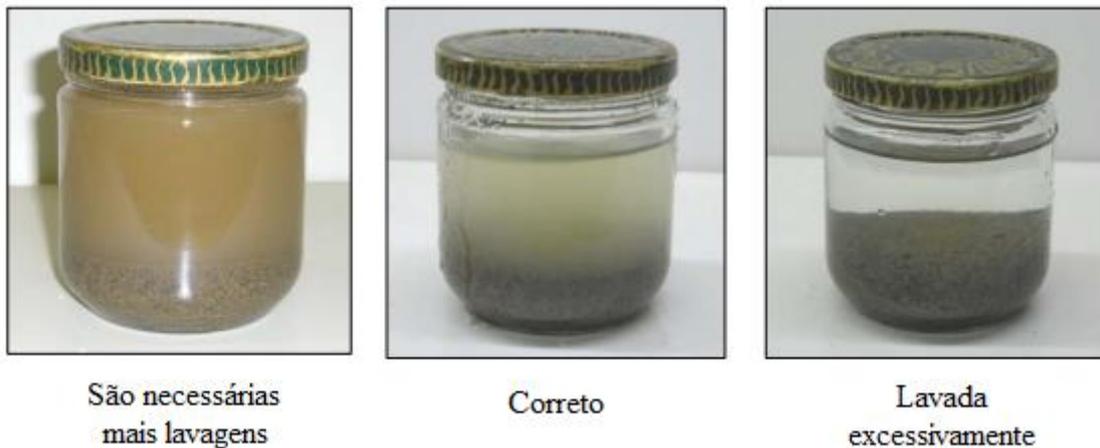


Figura 5.9: Teste visual para avaliação da lavagem da areia (CAWST, 2009)

Na sequência, procede-se para o peneiramento do material, a ser realizado da maior peneira (12 mm) para a menor (0,7 mm), conforme demonstrado na Figura 5.10 para a concepção do biofiltro proposto neste trabalho.

Subsequentemente ao peneiramento, destaca-se a necessidade do armazenamento das parcelas de solo com diferentes granulometrias separadamente, em local limpo e coberto, afastando-se assim a possibilidade de contato com animais ou com intempéries.

5.3.2. Instalação do biofiltro

A Figura 5.11 mostra a sequência de procedimentos sugeridos para a instalação do biofiltro proposto na residência dos usuários.

O primeiro passo da instalação do biofiltro é a montagem da tubulação de saída conforme proposição apresentada na Figura 5.4: Posicionamento e dimensões da tubulação de saída (medidas em cm). Para tanto, podem ser necessárias serra, lixa, furadeira, régua ou trena de, pelo menos, 80 cm de comprimento e relógio ou cronômetro.

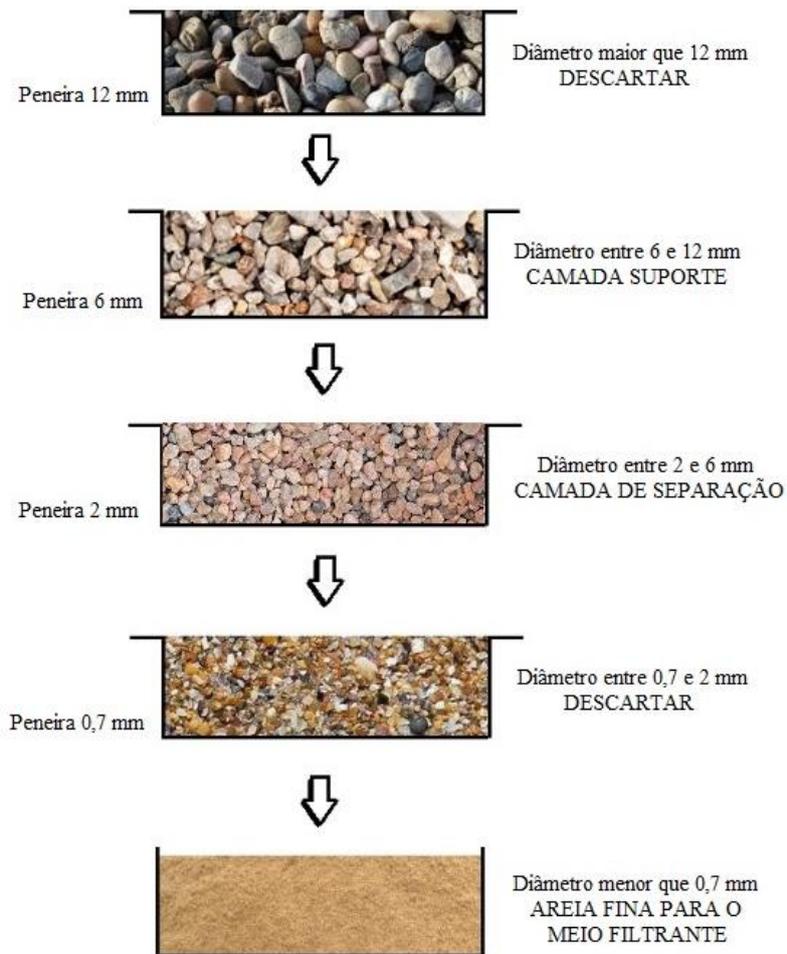


Figura 5.10: Sequência de peneiras para separação do meio filtrante e da camada suporte do biofiltro

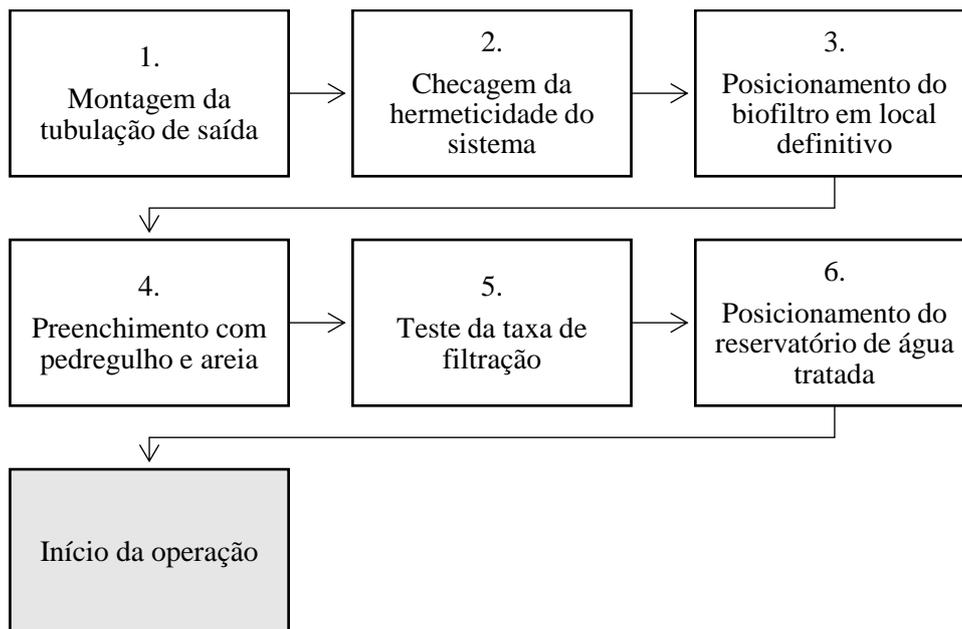


Figura 5.11: Passos para a instalação do biofiltro

Para a checagem da hermeticidade do sistema, de modo a evitar vazamentos de água durante a operação, sugere-se que o biofiltro seja preenchido com água, verificando-se eventuais perdas de água ao longo da tubulação e corrigindo-se quaisquer pontos de falha.

Para o posicionamento do biofiltro, consideram-se locais adequados, áreas que sejam preferencialmente dentro de casa, para proteção do filtro e conveniência para os usuários, favorecendo, assim, o uso prolongado da tecnologia. Além disso, sugere-se que o biofiltro seja alocado: em posição vertical e estável; na altura do chão; protegido de intempéries, crianças e animais; preferencialmente próximo ao local de preparação de alimentos ou na cozinha; em local onde haja espaço para o manuseio e abastecimento da água bruta no topo do filtro. O biofiltro deve ser posicionado no seu local definitivo preferencialmente antes de ser preenchido com pedregulho e areia, uma vez que a movimentação do filtro cheio deve ser evitada para manutenção da sua integridade.

Antes do preenchimento com pedregulho e areia, deve-se garantir que o recipiente utilizado para o biofiltro esteja livre de quaisquer resíduos, especialmente se for um material reaproveitado, e que a tubulação de saída esteja desobstruída. A seguir, é imprescindível que, antes de adicionar o cascalho ou a areia, seja colocada água limpa até preencher aproximadamente a metade da altura do biofiltro (CAWST, 2009; DESEA, 2017) (Figura 5.12), para que não haja formação de bolhas de ar nos interstícios dos grãos de areia e pedregulho.

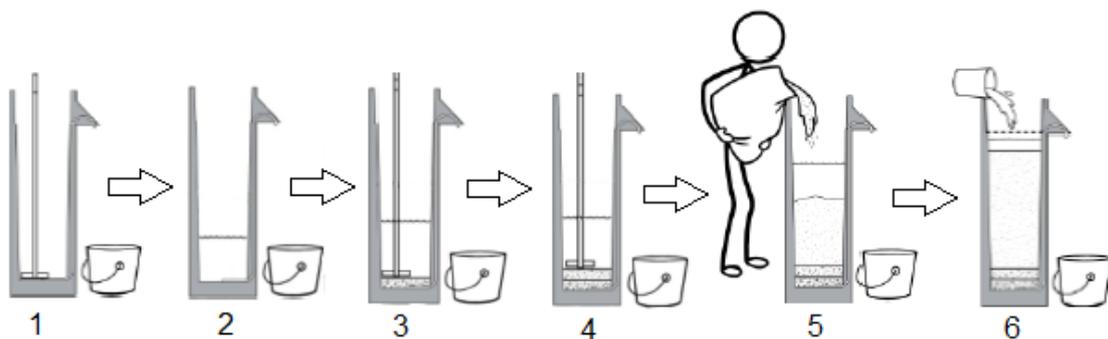


Figura 5.12: Etapas do preenchimento com pedregulho e areia (adaptado de CAWST, 2012)

Na sequência, adicionam-se os pedregulhos grosso e médio e a areia, nessa ordem, mediante a utilização de uma régua ou trena, de pelo menos 80 cm de comprimento, para

a determinação da altura do biofiltro a ser preenchida com cada camada de material. Para a areia, recomenda-se que o volume total de areia seja despejado rapidamente, para favorecer uma distribuição granulométrica homogênea.

Para equalizar o nível de água no biofiltro antes das etapas subsequentes, sugere-se abastecer com água o biofiltro até a tampa, permitindo a percolação de toda a água, que ainda não é apropriada para consumo humano e, portanto, deve ser descartada. Sugere-se então que o topo da camada de areia seja nivelado e a altura do sobrenadante, medida. Caso o nível da água seja diferente de 5 cm, recomenda-se adicionar ou remover um pouco de areia, até que se atinja essa altura. Por fim, o topo da camada de areia deve ser nivelado e a manta sintética, adicionada, se for o caso.

Para o teste da vazão, sugere-se que o biofiltro seja abastecido com água bruta até a tampa e o reservatório de coleta de água filtrada seja posicionado na saída do filtro. Então, cronometra-se o tempo necessário para que seja filtrado 1 litro de água – isso deve levar até 120 segundos (ou 2 minutos), em média, o que equivale a uma vazão de 0,5 L/min, adequada ao biofiltro proposto. Destaca-se que esse teste equivale ao teste proposto para a seleção da areia, no item 5.3.1.1 (Seleção da areia), antes feito na garrafa PET e agora em escala real. A Tabela 5.6 mostra a equivalência entre seg/L (medido) para L/min (vazão; calculado).

Tabela 5.6: Conversão de seg/L (medido) para L/min (vazão)

Segundos por litro	Litros por minuto
100	0,60
110	0,55
120	0,50
133	0,45
150	0,40
171	0,35
200	0,30

Caso a vazão inicial seja inferior a 0,3 L/min, é possível que o meio filtrante não tenha sido lavado suficientemente, na etapa de preparação, resultando em elevada resistência à percolação da água, devido à presença de impurezas nos espaços vazios dos grãos de areia. Entretanto, é provável que o biofiltro seja capaz de operar corretamente nessas condições, porém isso pode significar carreiras de filtração mais curtas que o esperado, com necessidade de limpezas frequentemente, o que pode eventualmente prejudicar a longevidade do uso, por reduzir a produção de água filtrada, tornando-se inviável para os usuários. Para corrigir o problema, pode ser feita uma lavagem dos primeiros centímetros da areia dentro do próprio filtro, conforme procedimento sugerido pela CAWST (2009).

Por outro lado, caso a vazão seja superior a 0,5 L/min, é provável que o biofiltro não seja efetivo no provimento de água de qualidade para consumo humano. Essa situação pode ser indicativa de que a areia foi lavada em excesso (CAWST, 2009) ou de que a carga hidráulica sobre o meio filtrante é excessiva, pressionando a percolação da água a uma taxa de filtração maior do que o previsto. Neste caso, configurações alternativas relativas à alimentação do biofiltro com água bruta (visando a redução da carga hidráulica sobre a areia) devem ser avaliadas – vide item 5.3.3.

Após o posicionamento do reservatório de água filtrada e dado que a vazão esteja adequada e com todos os ajustes finais feitos, o biofiltro pode iniciar a sua operação. Cabe destacar que nos primeiros dias de operação ocorre o amadurecimento do biofiltro, o que pode levar uma semana, aproximadamente (Almeida, 2018; Taira, 2008), a depender do clima local. Nesse período, a água filtrada não é considerada adequada para o consumo humano, devido à reduzida eficiência microbiológica do filtro.

5.3.3. Operação do biofiltro

Sugere-se, para o biofiltro proposto, operação em regime intermitente, com abastecimento manual com 15 litros de água bruta a cada seis horas (isto é, quatro vezes ao dia), intervalo considerado o período de pausa do filtro (ou tempo de detenção da água). Essa configuração garante a produção de água suficiente para atender as demandas propostas, além de fornecer ao biofiltro o tempo necessário para o tratamento da água. A escolha do volume de abastecimento se baseou tanto na capacidade máxima do reservatório de água acima do nível de água dentro do biofiltro como no atendimento à

vazão diária de 60 litros para as demandas básicas de uma família de até seis pessoas.

Destaca-se que os abastecimentos podem ser realizados, pelos usuários, com períodos de pausa iguais (isto é, alimentações do biofiltro a cada seis horas, conforme supramencionado), o que resultaria nas possibilidades de horários apresentadas na Tabela 5.7. Porém, a depender do impacto dessa proposta na dinâmica familiar, podem ser avaliadas alternativas, como aquela apresentada por Terin e Sabogal-Paz (2018), com intervalos de tempo diferentes entre as alimentações do filtro (4 e 12 horas), opção também apresentada na Tabela 5.7. Contudo, há que se considerar o efeito dos diferentes tempos de detenção da água no biofiltro para a sua eficiência na remoção de impurezas e sobretudo de patógenos, conforme reportado por Terin e Sabogal-Paz (2018) (vide revisão da literatura acerca dessa questão no item 3.2.4 Regime de operação).

Tabela 5.7: Possibilidades de horários para abastecimento do biofiltro

Período de pausa	1° abastecimento	2° abastecimento	3° abastecimento	4° abastecimento
6h	4:00	10:00	16:00	22:00
	5:00	11:00	17:00	23:00
	6:00	12:00	18:00	24:00
4h e 12h	8:00	12:00	16:00	20:00

Caso haja inviabilidade na manutenção dessa configuração de operação intermitente ou de manutenção da fonte de água bruta, podem ser feitas adaptações no projeto do biofiltro, de forma a acomodar a rotina dos usuários e das fontes de água disponíveis. Ademais, reconhece-se aqui o ônus da intermitência para o usuário responsável pela coleta da água bruta e pelo abastecimento do filtro, papel comumente desempenhado pelas mulheres (Funasa, 2019).

Além disso, podem ser necessárias adaptações ao projeto caso a validação do comportamento hidráulico do biofiltro proposto resulte em vazão superior a 0,5 L/min no teste de vazão mencionado (item 5.3.2), devido à elevada carga hidráulica referente aos 15 litros da água de alimentação, que totalizam 25 cm de altura sobre o meio filtrante. Nesse sentido, sugerem-se os trabalhos desenvolvidos por Terin e Sabogal-Paz (2018) e por Amui e Moruzi (2016) para orientar possíveis alterações a essa proposição inicial.

Terin e Sabogal-Paz (2018) desenvolveram dois filtros lentos de areia de escala domiciliar para produção de 60 L/dia, sendo que ambos os filtros permitem o abastecimento intermitente pelos usuários, apesar de um deles operar intermitentemente e outro, continuamente (vide Figura 3.5). No filtro intermitente, para garantir nível de água fixo (de 10 cm) e a taxa de filtração esperada, as autoras empregaram uma válvula de boia plástica abaixo do difusor, controlando a passagem de água. Além disso, projetaram o filtro com altura maior (de 144 cm, no total), garantindo assim volume para um reservatório interno extra acima do difusor. Dessa forma, mantém-se carga hidráulica reduzida sobre o meio filtrante, evitando-se a ocorrência de taxas de filtração acima do previsto, e permite-se alimentações do filtro menos frequentes em razão do maior volume interno para água bruta. Por conseguinte, essa é uma adaptação que pode ser feita no biofiltro proposto neste trabalho, a partir da utilização de recipiente com altura mais elevada para o biofiltro e da inclusão de uma boia similar àquela aplicada por Terin e Sabogal-Paz (2018).

Uma alternativa similar é a inclusão de um reservatório de água bruta extra externo e em cota superior ao biofiltro, com volume de 30 litros ou de 60 litros, por exemplo, o que possibilitaria apenas um ou dois abastecimentos diários, respectivamente, evitando sobrecargas sobre o usuário responsável. Nesse caso, é possível a manutenção das dimensões do biofiltro aqui proposto, sendo necessária apenas a adição de um reservatório externo e da aplicação do sistema de válvula de boia, controlando a liberação da água por esse reservatório, com funcionamento similar ao proposto por Terin e Sabogal-Paz (2018).

Amui e Moruzi (2016) desenvolveram um filtro lento de areia com dimensões para produção de 60 litros diariamente para aplicação domiciliar, que permite abastecimentos intermitentes, apesar de operar continuamente, com taxa constante. Para tanto, as autoras projetaram um reservatório extra acoplado ao filtro com capacidade de 20 litros (resultando três abastecimentos ao dia para possibilitar a produção de 60 L/dia), dotado de sistema de alimentação com boia para controle do volume de água bruta disponibilizado para o filtro (Figura 5.13). Assim, essa é também uma alternativa similar que pode inspirar adaptações no biofiltro proposto neste trabalho.

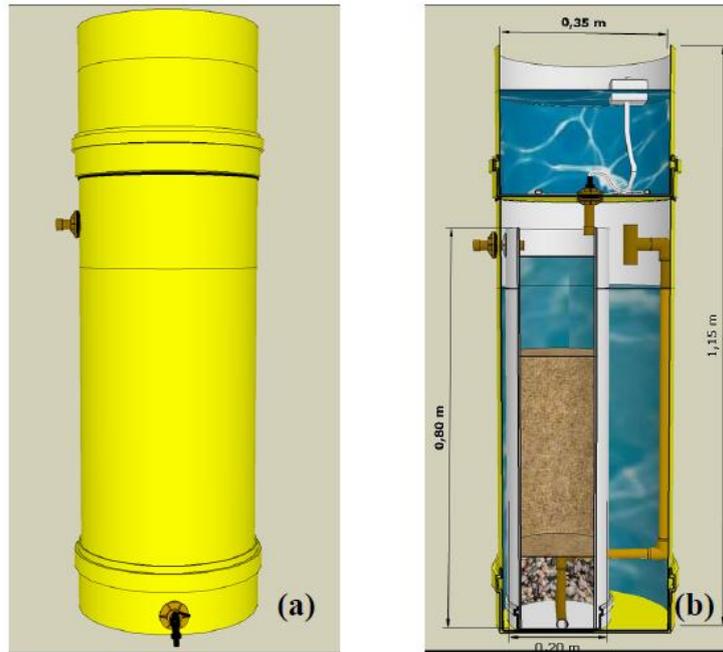


Figura 5.13: Filtro lento de areia domiciliar intermitente de Amui e Moruzi (2016)

Para o abastecimento do biofiltro, pode-se utilizar água proveniente de corpos hídricos superficiais ou subterrâneos ou da chuva. A água bruta deve possuir turbidez preferencialmente abaixo de 10 uT, sendo que o biofiltro tende a ser capaz de operar corretamente com turbidez de até 50 uT, eventualmente (vide item 3.1). É possível estimar se a água é adequada para utilização no biofiltro, em termos de turbidez, em um teste simples, proposta pela CAWST (2009), que pode ser feito pelos próprios usuários (vide item 3.4 TRATAMENTO MULTI-BARREIRA). Ademais, ressalta-se que fontes de água salgada ou salobra ou com cor verdadeira acima de 5 uH (Di Bernardo, 1993 e Castaño *et al.*, 1999) não são adequadas e não devem ser utilizadas para alimentar o biofiltro.

Destaca-se a importância da manutenção da mesma fonte de água durante a operação, de forma a garantir o equilíbrio para a microbiota presente no filtro e, conseqüentemente, a qualidade da água filtrada. Entretanto, é sabido que, em comunidades rurais e/ou isoladas, nem sempre estão presentes fontes de água perenes, havendo grande interferência da sazonalidade na consistência dessas fontes. Assim, em caso de completa inviabilidade do uso permanente da mesma água bruta, podem ser utilizadas duas ou mais fontes, desde que haja o mínimo de variações possível ao longo do tempo. Na experiência do prof. Ricardo Bernardes com o Projeto Sanear, por exemplo, foi viável operar os filtros lentos de areia comunitários de forma efetiva com duas fontes de água bruta, a depender da

estação do ano (vide item 3.3 Filtração lenta domiciliar).

Contudo, a alteração nas características da água bruta afeta diretamente a comunidade biológica que se estabelece no filtro, o que repercute na eficiência da filtração lenta na remoção de impurezas, nos primeiros dias de operação com a nova água. Ocorre, nesse caso, algo similar à maturação do filtro, com a adaptação da microbiota às novas condições impostas, de forma que a qualidade da água filtrada fica comprometida nos primeiros dias após a mudança, conforme Bernardes (comunicação pessoal). Portanto, é possível que se altere a fonte de água bruta em caso de necessidade e, uma vez feita a troca, a nova fonte deve ser mantida pelo maior período possível.

Conforme já discutido, dado que o filtro é operado intermitentemente, a altura da coluna d'água é variável ao longo do tempo. Destaca-se que o nível de água deverá ser mantido a todo momento acima do topo da areia (ou manta sintética, quando aplicável), garantindo-se assim a umidade necessária do meio filtrante para desenvolvimento e manutenção da microbiota, o que se garante pela configuração da tubulação de saída. Porém, é recomendável que se alimente o biofiltro com água bruta pelo menos diariamente e que sempre que houver retiradas significativas de água filtrada, haja também reabastecimento do filtro.

Devido à operação intermitente, a taxa de filtração é também variável ao longo do tempo, à medida que a água percola o meio filtrante e é coletada pelos usuários. A taxa de filtração é máxima no início da carreira de filtração e com o meio filtrante limpo, contudo, com a percolação e conseqüente filtração da água, ocorre a redução da carga hidráulica acima do meio filtrante e, conseqüentemente, a redução da taxa de filtração. Quando o biofiltro é alimentado com água bruta, a carga hidráulica sobre o meio filtrante se eleva e, conseqüentemente, a taxa de filtração volta a aumentar. Ainda assim, ao longo da carreira de filtração, a taxa de filtração vai decrescendo gradualmente, até que afeta a vazão de água filtrada produzida, tornando inviável dar continuidade à operação e ocasionando a necessidade de limpeza.

5.3.4. Limpeza e manutenção

No decorrer da operação do biofiltro, é esperado que o topo do meio filtrante fique colmatado pelas impurezas retidas, o que resulta na redução gradativa da taxa de filtração e, conseqüentemente, na diminuição da produção de água filtrada. Apesar de a baixa taxa de filtração não representar riscos para a qualidade da água, a vazão e o volume de água filtrada produzido são afetadas, podendo gerar a necessidade dos usuários de buscar outras fontes não tratadas para atender às demandas familiares diárias.

Nesse momento, a carreira de filtração deve ser encerrada para se proceder à limpeza do biofiltro. Para a realidade brasileira, é provável que essa limpeza deva ser feita a cada 25-30 dias (EMATER, 2013; Almeida, 2018) ou até mais (Terin e Sabogal-Paz, 2018), tempo que pode variar segundo o clima local, a estação do ano, a qualidade da água bruta, dentre outros fatores.

Para a limpeza, caso tenha sido implantada a manta sintética sobre a camada de areia no biofiltro, basta retirar a manta, que deve ser lavada com a água mais limpa disponível, da mesma forma que se lava roupa, friccionando uma parte do tecido contra a outra. Quando a lavagem da manta sintética liberar água clarificada, isso indica que a manta está limpa e pode ser novamente posicionada acima da areia e o biofiltro pode ser colocado em operação novamente, dando início, então, a uma nova carreira de filtração. Após várias lavagens, é esperado o desgaste da manta sintética, que deixa de desempenhar sua função de proteger a areia de forma efetiva. Quando a lavagem da manta sintética não resultar em melhora significativa na taxa de filtração e, conseqüentemente, na produção de água filtrada, a manta deve ser substituída. Porém, antes da colocação da nova manta sintética, deve-se proceder à limpeza da areia, que se encontra descrita a seguir, para recuperação da camada superficial da areia e correta operação do biofiltro.

Caso não tenha sido colocada manta sintética – ou no momento da troca da manta sintética –, os primeiros centímetros da areia devem ser lavados. Para tanto, o difusor deve ser retirado e o nível da água deve estar acima de onde estaria o difusor, de forma a garantir que haverá água o suficiente para a lavagem da camada superficial da areia. Em seguida, com a palma da mão ou com uma colher, deve-se movimentar levemente, em círculos, os primeiros centímetros da areia, cuidando para não misturar essa camada superficial com

as camadas mais profundas, o que pode prejudicar o desempenho do biofiltro. Esse processo de limpeza deve favorecer a liberação dos particulados dos grãos de areia na água, que deve então ser retirada com uma colher, copo ou pote pequeno. Esse procedimento deve ser repetido tantas vezes quanto for necessário até que a água reste razoavelmente clarificada (vide Figura 5.9). A seguir, o topo da camada de areia deve ser nivelado e o difusor, recolocado.

Alternativamente à lavagem do topo da areia descrita acima, pode-se, com uma colher ou com as mãos, remover do biofiltro os dois primeiros centímetros de areia. Esse é um processo mais simples, porém que reduz a altura do meio filtrante, o que pode prejudicar a qualidade da água, especialmente a longo prazo, após várias retiradas. Sugere-se que sejam feitas, no máximo, cinco retiradas, o que corresponde ao limite de 40 cm de altura da camada de areia no biofiltro. Após, faz-se necessária a aquisição de areia para reposição do volume retirado.

É esperado que esses procedimentos favoreçam a restauração da taxa de filtração e a operação do biofiltro. Isso porque a *schmutzdecke* e os particulados retidos se concentram no topo do meio filtrante (seja a manta sintética ou a camada superficial da areia) e a retirada do excesso dessas impurezas libera espaços vazios entre os grãos de areia para permitir o fluxo da água e, conseqüentemente, da vazão diária de projeto.

Destaca-se que, devido à perturbação provocada na *schmutzdecke*, a qualidade da água filtrada após a limpeza fica comprometida, não sendo indicada para consumo humano nos primeiros dias. A desinfecção cumpre um papel importante na redução do risco microbiológico, nesses momentos de maturação e de recuperação do biofiltro.

Além do meio filtrante, o biofiltro possui outros componentes que devem ser lavados e/ou limpos regularmente, conforme mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Instruções e frequência da limpeza dos componentes do biofiltro

Componente	Como higienizar	Frequência
Tampa do filtro e difusor	Lavar com água e sabão ou cloro	Semanal
Ponto final da tubulação de saída	Limpar com pano limpo e úmido ensaboado ou com cloro diluído (usar água filtrada no pano)	Semanal
Reservatório de água filtrada	1- Lavar com água filtrada e sabão ou cloro; 2- Se o reservatório possuir torneira, deixar a água da limpeza escorrer pela torneira; 3- Enxaguar bem com água filtrada; 4- Encher o reservatório com água filtrada com cloro ou água fervida por 30 minutos; 5- Se houver torneira, passar um pano úmido com cloro no bocal de saída da água.	Semanal

Por fim, o correto armazenamento da água filtrada é essencial para a garantia de sua qualidade microbiológica para o consumo humano, afastando a possibilidade de recontaminação, regularmente observada na literatura (Sobsey *et al.*, 2008; Liang *et al.*, 2010). Portanto, a retirada da água filtrada de dentro do reservatório deve ser feita através da torneira ou entornando-se o reservatório em outro recipiente, evitando-se assim o contato da água filtrada com as mãos ou com outros objetos.

A desinfecção é uma importante etapa do tratamento da água e deve ser realizada sempre que possível (Funasa, 2019), sendo particularmente necessária nos seguintes casos (CAWST, 2012): durante a primeira semana de operação, em que está ocorrendo a maturação do biofiltro; quando há mudança da fonte de água bruta; e nos primeiros dois dias após a limpeza. São sugeridos, como métodos de desinfecção da água filtrada, a desinfecção solar (SODIS), a fervura da água ou a cloração, cujos procedimentos estão descritos no item 3.4 TRATAMENTO MULTI-BARREIRA.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do levantamento e da sistematização da literatura relevante na área da filtração lenta, foi concebido um biofiltro – filtro lento de areia de escala domiciliar – para o tratamento de água para consumo humano com características voltadas ao atendimento das demandas básicas unifamiliares em áreas rurais brasileiras não atendidas por sistemas centralizados de abastecimento de água.

O biofiltro resultante é capaz de filtrar 60 litros de água diariamente, sendo sugerida operação intermitente, com quatro abastecimentos manuais diários de 15 litros, o que constitui a opção mais econômica do ponto de vista de custos iniciais, resultando em uma menor dimensão do biofiltro, com conseqüente valor reduzido para aquisição de materiais, totalizando R\$189,10. Porém, caso essa configuração não seja a mais adequada para a família ou comunidade interessada, é também possível promover alterações no projeto de forma a reduzir o número de abastecimentos diários.

Conclui-se, portanto, que o biofiltro projetado mostra-se acessível do ponto de vista financeiro, fator importante para o foco da proposta inicial de atender famílias residentes no meio rural. Além de ser viável economicamente, o biofiltro mostra-se como tecnologia apropriada à realidade do meio rural, devido à simplicidade operacional já amplamente demonstrada na literatura, aos baixos custos envolvendo a operação (praticamente apenas reposição da areia retirada nas limpezas) e à possibilidade do envolvimento da comunidade desde o processo de tomada de decisão até a operação, favorecendo a continuidade do uso no longo prazo.

Nesse contexto, espera-se que o presente estudo se torne um incentivo para o engajamento de iniciativas públicas na ampliação da cobertura dos serviços de abastecimento do acesso à água de qualidade, “sem deixar ninguém para trás” (UNESCO, 2019). Assim sendo e tendo em vista que o presente trabalho consiste apenas em uma etapa inicial de um processo maior para aplicação desta tecnologia na prática, recomenda-se:

- Orçamento do material filtrante e validação dos procedimentos propostos para aquisição de areia e de pedregulho localmente;
- Confeção de protótipos do biofiltro proposto, validando-se a simplicidade de confecção e operação na prática, levando em conta o ponto de vista dos usuários;

- Validação do comportamento hidráulico (carga hidráulica, taxa de filtração, vazão) e da eficiência de remoção de impurezas e patógenos do biofiltro proposto;
- Seleção de famílias localizadas em áreas ruais sem aglomerações para iniciar processo de trocas e compartilhamento de informações, adaptando o projeto do biofiltro às peculiaridades locais, com o apoio do poder público;
- Validação do biofiltro enquanto solução apropriada para essas residências;
- Ampliação do acesso a essa tecnologia, a partir da divulgação dos resultados obtidos, de forma a subsidiar políticas públicas e nortear investimentos nesse sentido;
- Aprimoramento da cartilha para os usuários, com a inclusão de informações mais práticas, e a confecção de outros materiais próprios para apoio aos técnicos responsáveis pela implantação do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT – Associação Brasileira de Indústrias de Não-tecidos. (2017). Manual de não-tecidos: Classificação, identificação e aplicações de não-tecidos. São Paulo, 36 p. Disponível em < <http://www.abint.org.br/publicacoes.html>>. Acesso em 21nov2019.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992). NBR 12.216 – *Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro, 18 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR-ISO 9.863-1 – *Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas, Parte 1: Camada única*. Rio de Janeiro, 5 p.

Almeida, M.C. (2018). Avaliação do Uso de Mantas Sintéticas Não Tecidas e Areia Grossa na Filtração Lenta em Escala Domiciliar – Estudo Comparativo. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília.

Amui, C.R.; Moruzzi, R.M.C.M. (2016). Desenvolvimento e avaliação de protótipos de filtro lento para tratamento de água em domicílios rurais. Monografia de Projeto Final submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Anderson, W. B., Deloyde, J. L., Van Dyke, M. I., Huck, P. M. (2009). Influence of design and operating conditions on the removal of MS2 bacteriophage by pilot-scale multistage slow sand filtration. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 58(7), 450-462.

Anggraini, A.K.; Grotelüschen, E.; Silva, A.; Fuchs, S. (2015). Investigation on Slow Sand Filtration Performance: Influence of Effective Grain Size on the Particle Removal. In: *Anais do 7th Eastern European Young Water Professionals Conference*, Belgrade, Serbia, p. 312-319.

APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. APHA, 20^a edição, Washington, DC, E.U.A.

Baker, M.N. (1949). The Quest for Pure Water: The History of Water Purification from the Earliest Records to the Twentieth Century. *The American Water Works Association, INC*. New York, 1948.

Baker, D. L. E Duke, W. F. (2006). Intermittent slow sand filters for household use – a field study in Haiti. In: Gimbel, R.; Graham, N. J. D.; Collins, M. R. (eds.) Recent progress in slow sand and alternative biofiltration processes. *IWA Publishing*, London, UK, 278-282.

Bauer, R.; Dizer, H.; Graeber, I.; Rosenwinkel, K.H.; López-Pila, J.M. (2010). Removal of bacterial fecal indicators, coliphages and enteric adenoviruses from waters with high fecal pollution by slow sand filtration. *Water Research*, 45(2011) 439 e452.

Baumgartner, J., Murcott, S., Ezzati, M. (2007). Recosidering ‘appropriate technology’: the effects of operating conditions on the bacterial removal performance of two household drinking-water filter systems. *Environmental Research Letters*, 2, 1-6.

Bellamy, W.D.; Silverman, G.P.; Hendricks, D.W.; Logsdon, G.S. (1985a). Removing Giardia Cysts With Slow Sand Filtration. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 77, No. 2, Giardiasis: The New Waterborne Disease, 52-60.

Bellamy, W. D., Hendricks, D. W., Logsdon, G. S. (1985b). Slow sand filtration: influences of selected process variables. *Journal of American Water Works Association*, 62-66.

Bernardes, R.S.; Costa, A.A.D.; Bernardes, C. (2018). Projeto Sanear Amazônia: tecnologias sociais e protagonismo das comunidades mudam qualidade de vida nas reservas extrativistas. *Desenvolv. Meio Ambiente*, v. 48, Edição especial: 30 Anos do Legado de Chico Mendes, p. 263-280, novembro 2018. DOI: 10.5380/dma.v48i0.58510. e-ISSN 2176-9109.

Bowles, B.A.; Drew, W.M.; Hirth, G. (1983). The application of the Slow Sand Filtration Process to the Treatment of Small Town Water Supplies. *Australian Water & Wastewater Association*, 10th Federal Convention. Sydney, 1983.

Brasil (2017). *Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5*. Ministério da Saúde, 3 de outubro de 2017.

Brasil (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República.

Brasil (2007). Lei Federal nº. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm>. Acesso em 18jan2023.

Brasil (2010). Decreto Federal nº. 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm>. Acesso em 18jan2023.

Brasil (2021). Portaria GM/MG nº. 888, de 4 de maio de 2021. *Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html>. Acesso em 2dez2022.

Calvo-Bado, L.A.; Pettitt, T.R.; Parsons, N.; Petch, G.M.; Morgan, A.W.; Whipps, J.M. (2002). Spatial and Temporal Analysis of the Microbial Community in Slow Sand Filters Used for Treating Horticultural Irrigation Water. *Applied And Environmental Microbiology*, p. 2116–2125.

Castaño, G.G.; Montero, J.L.; Visscher, J.T. (1999). Filtración em múltiples etapas – Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Projeto UNESCO "Promoción de

atividades orientadas a la sostenibilidad en el sector de agua potable, saneamiento básico y conservación del medio ambiente. Santiago de Cali. ISBN: 958-8030-20-X.

Castaño, G.G.; Visscher, J.T. (1987). Filtración Lenta en Arena y Pretratamiento – Tecnología para potabilización de agua. Centro Internacional de Referencia para el abastecimiento de agua y saneamiento – CIR, La Haya, Holanda; Universidade del Valle, Cali, Colombia; Ministerio de Salud, Dirección de Saneamiento, Colombia.

CAWST – Center for Affordable Water and Sanitation Technology. (2009). Biosand filter manual: Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance. A CAWST Training Manual, September 2009 Edition. Disponível em: <www.cawst.org>. Acesso em 7mar2022.

CAWST – Center for Affordable Water and Sanitation Technology. (2012). Biosand filter construction manual. August 2012. Disponível em: <www.cawst.org>. Acesso em 14jan2023.

Chan, S.; Pullerits, K.; Riechelmann, J.; Persson, K.M.; Rådström, P.; PAUL, C.J. (2018). Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). *Water Research* 138 (2018) 27e36.

Cleasby J.L. (1991). Source water quality and pretreatment options for slow filters. In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, New York, E.U.A., 69-100.

Crittenden, J.C.; Trussell, R.R.; Hand, D.W. Howe, K.J.; Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. 3rd edition, 1906 p.

DESEA Peru. (2017). DESEA Peru PVC Biosand Water Filter Construction and Installation Manual. Prepared by Sandy Hart, P. Geo. Asociación DESEA Perú. Lamay, Cusco, Perú. Disponível em: <www.deseaperu.org>. March 2017 (Vers. 2).

Di Bernardo, L. (1993). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Vol 2. Rio de Janeiro.

Di Bernardo, L.; Brandão, C.C.S.; Heller, L. (1999). *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas*. PROSAB, Rio de Janeiro, 114p.

Di Bernardo, L.; Dantas, A. D. B. (2005). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Vol. 2. RiMa, 2^a edição, São Carlos 792p.

Di Bernardo, L.; Dandas, A.D.B.; Voltan, P.E.N. (2017). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 3^a edição, 2017.

Dizer, G.G.; Bartel, H.; Wiese, H.B.; López-Pila, J.M. (2004). Contribution of the colmation layer to the elimination of coliphages by slow sand filtration. *Water Science and Technology*, Vol 50, n° 2, pp 211–214, 2004 *IWA Publishing*.

Donison, K. S. (2004). Household scale slow sand filtration in the Dominican Republic. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Massachusetts Institute of Technology. 96p.

Duke W.F.; Nordin R.N.; Baker D.; Mazumder A. (2006). The use and performance of BioSand filters in the Artibonite valley of Haiti: a field study of 107 households Rural Remote Health. *Rural and Remote Health* 6.

EDUCACIVIL. (2020). 3 Tipos de solos e suas principais características. Disponível em: <<https://educacivil.com/3-tipos-de-solos-e-suas-principais-caracteristicas/>>. Acesso em 28fev2023.

Elliott, M.A.; Stauber, C.E.; Koksai, F.; Liang, K.R.; Huslage, D.K.; Digiano, F.A.; Sobsey, M.D. (2006). The operation, flow conditions and microbial reductions of an intermittently operated, household-scale slow sand filtration. In: Gimbel, R.; Graham, N.J.D.; Collins, M.R. Recent progress in slow sand and alternative biofiltration processes. *IWA Publishing, London, UK*, 268-277.

Elliott, M. A.; Stauber, C. E.; Koksai, F.; Digiano, F. A.; Sobsey, M. D. (2008). Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter. *Water research*, 42(10), 2662-2670.

Ellis, K.V.; Wood, W.E. (1985). Slow Sand Filtration. *Critical Reviews in Environmental Control*, 15:4, 315-354.

Emater-MG. (2013). Leal, J.T.C.P; Fernandes, M.R; Pereira, R.T.G. Boas práticas ambientais na cafeicultura. Belo Horizonte, 2013, 64 p. il.

Emater-MG. (2016). Leal, J.T.C.P. Água para consumo na propriedade rural. Belo Horizonte/MG, 2016, 18 p.

Embrapa. (2014). ABC da Agricultura Familiar – Saneamento básico rural. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Instrumentação - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília/DF, 1ª edição.

Emelko, M.B. (2003). Removal of viable and inactivated Cryptosporidium by dual- and tri-media filtration. *Water Research* 37 (2003) 2998–3008.

Ferreira. E. P.; Ferreira. A. C.; Pantaleão. F. S.; Ferreira. Y. P. (2012). Análise de qualidade da água tratada pelas estações de tratamento baseado no programa de autogestão comunitária. Anais do XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Salvador – BA. 03 a 07 de Junho.

Ferreira, E.P.; Ferreira, J.T.P.; Pantaleão, F.S.; Ferreira, Y.P.; Albuquerque, K.N.; Ferreira, T.C. (2014). Abastecimento de água para consumo humano em comunidades quilombolas no município de Santana do Mundaú – AL. *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol.07, n.06, 1119-1125.

FGV (2017). Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia FGV. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8142480/4217656/TABELASOFGV02.pdf>>. Acesso em 01abr2022.

Fogel D.; Isaac-Renton J.; Guasparini R.; Moorehead W.; Ongerth J. (1993). Removing Giardia and Cryptosporidium by Slow Sand Filtration. *American Water Works Association*, 85: 77–84.

Funasa (2019). Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR). Brasília/DF, 1ª edição, 2019. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica/-/asset_publisher/ZM23z1KP6s6q/content/programa-nacional-de-saneamento-rural-pnsr-?inheritRedirect=false>. Acesso em 12 jun 2022.

Goddard, M.R. (1980). The Ecology of Protozoan Populations of Slow Sand Filters, with Particular Reference to the Ciliates. Tese de doutorado submetida à Universidade de Londres para obtenção de título de Ph.D. Royal Holloway College, University of London.

Gottinger, A. M.; Mcmartin, D. W.; Price, D.; Hanson, B. (2011). The effectiveness of slow sand filter to treat Canadian rural prairie water. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 455-463.

Graham, N. J. D.; Mbwette, T. S.; Di Bernardo, L. (1991). Fabric Protected Slow Sand Filtration – A Review. *NH Slow Sand Filtration Workshop – AWWA Oct. 1991*, Durham, N. H, USA.

Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030 (GTSCA). (2030). IV Relatório Luz da Sociedade Civil da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável: Brasil. Disponível em: <<https://gtagenda2030.org.br/relatorio-luz/relatorio-luz-2020/>>. Acesso em 02fev2023.

Gucchi, E., Leta, S., Boelee, E. (2014). *Efficiency of slow sand filtration in removing bacteria and turbidity from drinking water in rural communities of central Ethiopia. African Journal of Microbiology Research*, 8, 15p.

Haig, S.J.; Quince, C.; Davies, R.L.; Dorea, C.C.; Collins, G. (2015). The Relationship between Microbial Community Evenness and Function in Slow Sand Filters. *Research Article: Mbio*, September/October 2015, Volume 6, Issue 5 e00729-15.

Heller, L.; Pádua, V.L. (2010). Abastecimento de água para consumo humano. Volume 2. Editora UFMG, 872 pp.

Heller, L.; Vieira, M.B.C.M.; Brito, L.L.A. (2006). Desempenho da Filtração Lenta em Areia Submetida a Cargas de Pico de Oocistos de *Cryptosporidium Sp*, Bactérias e Sólidos: Uma Avaliação em Instalação Piloto. Artigo Técnico. *Eng. sanit. ambient.* Vol.11- Nº 1 - jan/mar 2006, 27-38.

Huisman, L.; Wood, W. (1974). Slow sand filtration. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

Iaccovazo, A. (2013). Projeto Sanear, Saneamento básico uma realidade para seis comunidades do Médio Juruá. YouTube, publicado em 10 de novembro de 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qsm-rCGypps>>. Acesso em 19 mar 2021

IBGE, (2014). Moradores em domicílios particulares permanentes, por classes de rendimento mensal domiciliar, segundo a situação do domicílio e algumas características do domicílio - Brasil - 2014. Pesquisa nacional por amostra de domicílios. IBGE, Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2014/brasil_defaultxls_brasil.shtm>. Acesso em 23jun2019.

ITS BRASIL (2019). Caderno de Debate – Tecnologia Social no Brasil. São Paulo: ITS. 2004: 26. Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/em-2019-mais-de-81-mil-criancas-de-0-a-4-anos-foram-internadas-devido-as-doencas-de-veiculacao-hidrica/>> Acesso em 13nov2022.

Jellison, K.L.; Dick, R.I.; Weber-Shirk, M.L. (2000). Enhanced Ripening Of Slow Sand Filters. *Journal of Environmental Engineering*. 126:1153-1157.

Joubert, E.D.; Pillay, B. (2008). Visualisation of the microbial colonisation of a slow sand filter using an Environmental Scanning Electron Microscope. *Electronic Journal of Biotechnology*, ISSN:0717-3458.

Law, S.P.; Melvin, M.M.A.L.; Lamb, A.J. (2001). Visualisation of the establishment of a heterotrophic biofilm within the schmutzdecke of a slow sand filter using scanning electron microscopy. *Biofilm Journal*, Volume 6, Paper 1 (BF01001) 2001.

Liang, K.; Sobsey, M.; Stauber, C.E. (2010). Improving Household Drinking Water Quality: Use of BioSand Filters in Cambodia. WSP - Water and Sanitation Program. Disponível em: <https://scholarworks.gsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1075&context=iph_facpub>. Acesso em 24out2022.

Logan, A.J.; Stevik, T.K.; Siegrist, R.L.; Rønn, R.M. (2001). Transport and Fate of Cryptosporidium Parvum Oocysts in Intermittent Sand Filters. *Water Research*. Vol. 35, No. 18, pp. 4359–4369.

Logsdon, G.S. (1991). Slow sand filtration. *American Society of Civil Engineers*, 277p.

Logsdon, G.S. (2008). Water Filtration Practices. *American Water Works Association*. 1st Edition. 314 p.

Luxton, P.J.; Graham, N.J.D. (1998). Preliminary evaluation of natural fabrics in slow sand filtration. *J Water SRT – Aqua*, Vol 47, N° 3, pp. 95-106.

Mbwette, T. S. A.; Graham, N. J. D. (1987). Improving the efficiency of slow sand filtration with non-woven synthetic fabrics. *Filtration & Separation*, 46-50.

Mbwette, T. S. A., Steitieh, M. A. R., Graham, N. J. D. (1990). Performance of fabric-protected slow sand filters treating a lowland surface water. *Water and Environment Journal - J.IWEM*, 4, 51-61.

Ministério Da Saúde - MS. (2014). Cuidados com água para consumo humano. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/folder/cuidados_agua_consumo_humano_2014.pdf>. Acesso em 11dez2022.

Muhammad, N., Ellis, K., Parr, J., Smith, M.I D. (1996). Optimization of slow sand filtration. In: *Anais 22nd WEDC Conference*, New Delhi, India, p. 283-285.

Nitzche, K.S.; Weigold, P.; Lösekann-Behrens, T.; Kappler, A.; Behrens, S. (2015b). Microbial community composition of a household sand filter used for arsenic, iron, and manganese removal from groundwater in Vietnam. *Chemosphere* 138 (2015) 47–59.

Oki, L.R.; Bodaghi, S.; Lee, E.; Haver, D.; Pitton, B.; Nackley, L.; Mathews, D.B. (2017). Elimination of Tobacco mosaic virus from irrigation runoff using slowsand filtration. *Scientia Horticulturae*, 217 (2017), pp 107–113. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/scihorti>. Acesso em 01fev2023.

OMS (2013). Household water treatment and safe storage: manual for the participant. *WHO Western Pacific Regional*. 131p. Disponível em: <http://www.wpro.who.int/environmental_health/documents/docs/Household_Water_Treatment_Safe_Storage_PARTICIPANT.pdf>. Acesso em 22jun2019.

Pádua, V.L.; Di Bernardo, L. (1998). Emprego de mantas sintéticas nos estudos de tratabilidade de água quimicamente coagulada. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu/PR.

Paterniani, J.E.S.; Conceição, C.H.Z. (2004). Eficiência da Pré-Filtração e Filtração Lenta no Tratamento de Água para Pequenas Comunidades. *Eng.ambient.*, Espírito Santo do Pinhal, v.1, n.1, p.000-000.

Plansab (2019). Plano Nacional de Saneamento Básico. Ministério do Desenvolvimento Regional – Secretaria Nacional de Saneamento. Brasília/DF, 2019.

Ranjam, P.; Prem, M. (2018). Schmutzdecke - A Filtration Layer of Slow Sand Filter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* (2018) 7(7): 637-645.

Reis, L.G. (2019). Rede Mais HD, Record TV - Balanço do Campo. Projeto da EMATER ajuda no tratamento de água para zona rural. YouTube, publicado em 14 de novembro de 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=c4hWKcJkCXU>>. Acesso em 04fev2023.

Ribeiro, L.A.; Queluci, G.C. (2021). Passo a passo para elaboração de cartilhas. EduCAPES. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/704485/2/Como%20fazer%20uma%20cartilha%20%281%29.pdf>>. Acesso em 12jan2023.

Richards, A. D. (1977). Distribution and activity of protozoa in slow sand filters, *J. Protozool.*, 9, 75.

Sanín, M.A.J. (2013). Evaluación de una manta sintética no tejida en un sistema piloto de filtración lenta para el tratamiento del agua. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de M.Sc. en Ingeniería Urbana con énfasis en Servicios Públicos. Universidad de Medellín, Facultad de Ingenierías, Maestría en Ingeniería Urbana, Medellín.

Santos, F.F.S. (2015). Comparação entre os Meios Filtrantes Areia e Não-tecido Sintético na Eficiência da Filtração Lenta para Tratamento de Água. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos

exigidos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na Área de Água e Solo. Campinas/SP, 2015.

Schmidt, W.P.; Cairncross, S. (2009) Household Water Treatment in Poor Populations: Is There Enough Evidence for Scaling up Now? *Environmental Science & Technology* / VOL. 43, NO. 4, pp 986-992.

Sesan - Secretaria Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional - do Ministério da Cidadania - MDS. (2016). Modelo Da Tecnologia Social De Acesso À Água Nº 07: Sistema Pluvial Multiuso Comunitário. Programa Cisternas - Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água. Disponível em: <http://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/seguranca_alimentar/cisternas_marcoleg_al/tecnologias_sociais/Sistema%20Pluvial%20Multiuso%20Comunitario07/IO_SESAN_n7_09102014_ANEXO.pdf>. Acesso em 17ago2022.

Siqueira-Castro, I.C.V.; Greinert-Goulart, J.A.; Bonattil, T.R.; Yamashirl, S.; Franco, R.M.B. First report of predation of Giardia sp. cysts by ciliated protozoa and confirmation of predation of Cryptosporidium spp. oocysts by ciliate species. *Environ Sci Pollut Res* (2016) 23:11357–11362.

Siwila, S.; Brink, I.C. (2019). Low cost drinking water treatment using nonwoven engineered and woven cloth fabrics. *IWA Publishing, Journal of Water and Health*, pp. 98-112. DOI: 10.2166/wh.2018.226. Disponível em: <>. Acesso em 12jun2022.

Shigeoka, C.Y.; Maciel, P.M.F.; Sabogal-Paz, L.P. (2017). Remoção de turbidez em filtro lento domiciliar operado em fluxo contínuo. *Congresso ABES, FENASAN, São Paulo, 2017*.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2021). Abastecimento de água. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/ab>>. Acesso em 10mar2023.

Sobsey, M.D.; Stauber, C.E.; Casanova, L.M.; Brown, J.M. Elliott, M.A. (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.* 2008, 42, 4261–4267.

Sutherland, I.W. (2001). The biofilm matrix – an immobilized but dynamic microbial environment. *TRENDS in Microbiology* Vol.9 No.5 May 2001.

Teixeira, T.G.L. (2019). Emprego de Microesferas de Poliestireno como Substitutas de oocistos de Cryptosporidium na Avaliação em Escala Piloto da Filtração Direta Descendente. Monografia de Projeto Final submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental. Brasília/DF, 2019.

Terin, U.C.; Sabogal-Paz, L.P. (2018). Microcystis aeruginosa and microcystin-LR removal by household slow sand filters operating in continuous and intermittent flows. *Water Research* 150 (2019) 29e39.

Timms, S., Slade, J. S., Fricker, C. R. (1995). Removal of Cryptosporidium by slow sand filtration. *Water Science Technology*, 31(5-6), 81-84.

WHO/UNICEF, 2019. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019: Não deixar ninguém para trás - resumo executivo. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367303_por. Acesso em 25jun2019.

Visscher, J.T. (2006). Facilitating Community Water Supply Treatment: From transferring filtration technology to multi-stakeholder learning. Thesis Wageningen Universiteit. 256 p. ISBN: 90-8504-382-4.

Young-Rojanschi, C.; Madramotoo, C. (2014). Intermittent versus continuous operation of biosand filters. *Water Research*, v. 49, p. 1-10.

Water For Cambodia (2023). Our biosand filters. Disponível em: <https://www.waterforcambodia.org/biosand-filters.html>. Acesso em 24jan2023.

Weber-Shirk, M. L.; Dick, R. I. (1997a). Physical-chemical mechanisms in slow sand filters. *Journal of American Water Works Association*, 89(1), 87-100.

Weber-Shirk, M. L.; Dick, R. I. (1997b). Biological mechanisms in slow sand filters. *Journal of American Water Works Association*, 89(2), 72-83.

WHO (2011). How much water is needed in emergencies. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/tn9_how_much_water_en.pdf. Acesso em 20jan2022.

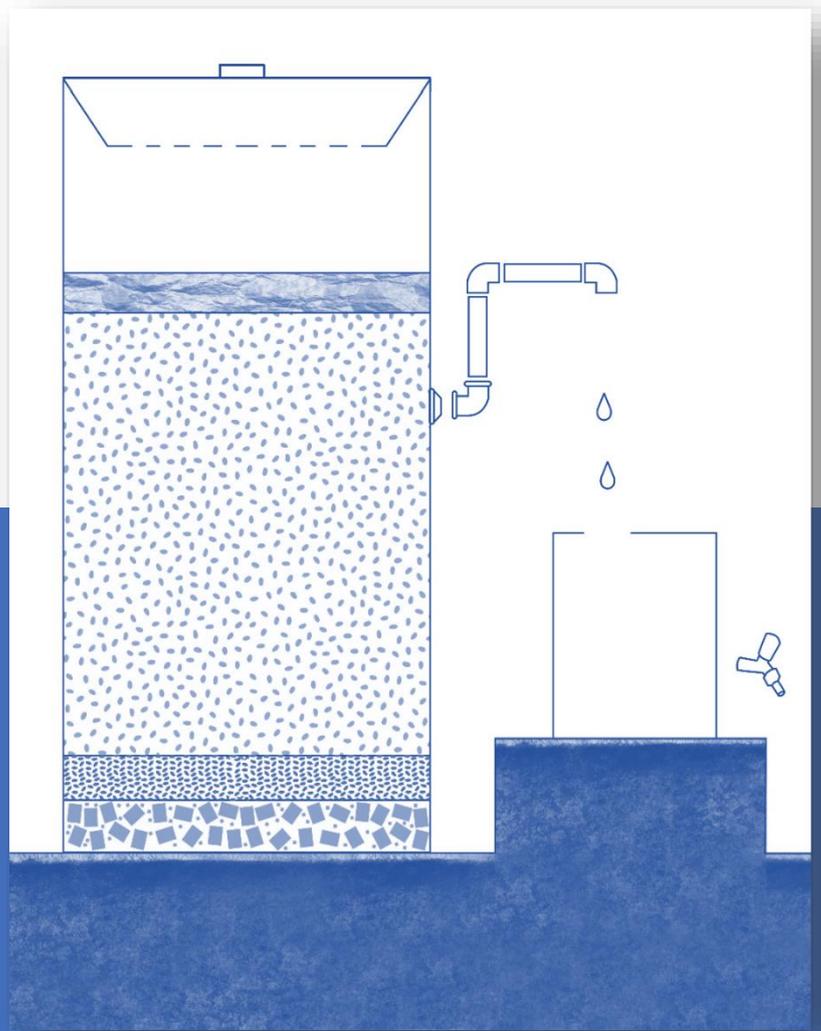
WHO (2017). Guidelines for drinking water. Fourth Edition incorporating the first addendum. ISBN 978-92-4-154995-0.

WHO/UNICEF (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene I 2000-2017: Special focus on inequalities. Disponível em: <https://www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019>. Acesso em 12mar2023.

ANEXO 1: Orçamentos dos materiais para o biofiltro proposto

Produto	Qtd.	Preço Unitário (R\$)			Preço médio (R\$)	Preço Total (R\$)	Imagem (fora de escala)
		MINHA TERRA	SOS Materiais	JS Materiais para Construção			
Recipiente do biofiltro (PVC; 85 cm de altura e 30 cm de diâmetro)	1	69,90	-	69,99	69,95	69,95	
Tubo 20 mm (PVC; 1 metro)	1,5m	5,00/metro	6,70/metro	5,80/metro	5,83/metro	8,75	
Cap 20 mm PVC	4	1,50	2,40	1,99	1,96	7,84	
Conector com 5 saídas de 20 mm PVC	1	9,45	-	10,70	10,08	10,08	
Joelho 90° 20 mm PVC	4	1,00	1,35	1,09	1,15	4,60	
Adaptador flange 20x1/2"	1	15,80	13,55	13,99	14,45	14,45	
Adaptador soldável curto 20x1/2	1	2,00	1,30	1,75	1,68	1,68	

Borracha de silicone flexível vedante (diâmetro interno 2,2 cm; diâmetro externo 4cm)	4	2,99	3,05	2,80	2,94	11,76	
Suporte para tubulação exterior (PVC; com furo de 22 mm)	1	-	2,60	3,00	2,80	2,80	
Bacia de plástico 30 cm de diâmetro e ≥10 cm de profundidade (difusor: com furos de 2,0-3,0 mm espaçados de 2,0-2,5 cm)	1	-	16,90	19,90	18,40	18,40	
Balde de 20 litros (reservatório de água filtrada: PVC; com furo de 22 mm na tampa)	1	-	25,95	29,90	27,93	27,93	
Torneira	1	5,00	4,70	4,90	4,87	4,87	
COLA PVC (tubo pequeno 17g)	1	3,50	3,50	2,99	3,33	3,33	
Fita veda rosca (5 metros)	1	3,00	2,50	2,50	2,67	2,67	
TOTAL						189,10	



Cartilha: Biofiltro para uso domiciliar em áreas rurais brasileiras

Por Cristiane Frizzo de Oliveira
e Yovanka Pérez Ginoris

Abril de 2023



 **CNPq**

Esta cartilha foi desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, da Universidade de Brasília, pela mestranda Cristiane Frizzo de Oliveira, sob orientação da Profa. Dra. Yovanka Pérez Ginoris.

OLIVEIRA, C.F.; GINORIS, Y.P. (2023). Cartilha: Biofiltro para uso domiciliar em áreas rurais brasileiras. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília. Brasília/DF, 2023.

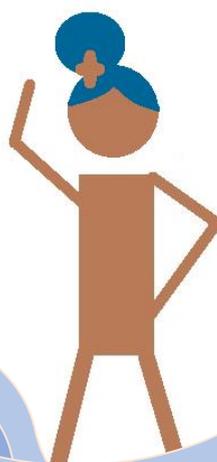
O trabalho completo de dissertação pode ser encontrado no repositório de trabalhos de pós-graduação da Universidade de Brasília.

Em caso de dúvidas, comentários ou sugestões, entre em contato: cristiane_frizzo@yahoo.com.br

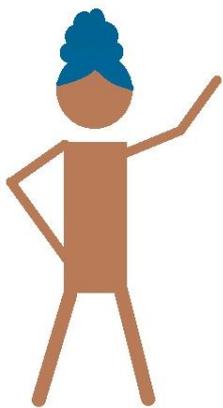
O QUE VOCÊ VAI ENCONTRAR NESTA CARTILHA

Que é um biofiltro e como ele funciona?	115
Posso beber a água filtrada do biofiltro?.....	116
<i>Para quem é o biofiltro?</i>	117
Vantagens da filtração lenta.....	117
Limitações da filtração lenta	118
Para saber mais.....	118

Eu sou a Yoyo e vou te apresentar o biofiltro. Vamos?



Que é um biofiltro e como ele funciona?



O biofiltro é um filtro lento de areia de tamanho reduzido, para o tratamento da água, que pode ficar na cozinha ou em outro cômodo, dentro de casa.

A água bruta (da chuva, de rios ou de poços) é colocada no topo do biofiltro, com o auxílio de um balde. Lentamente, a água vai passando pela areia. Aí ocorre a filtração da água, com a remoção de partículas e de micro-organismos patogênicos (que podem causar doenças no ser humano). A água filtrada é, então, coletada, em outro balde, no fim da tubo de saída do biofiltro.

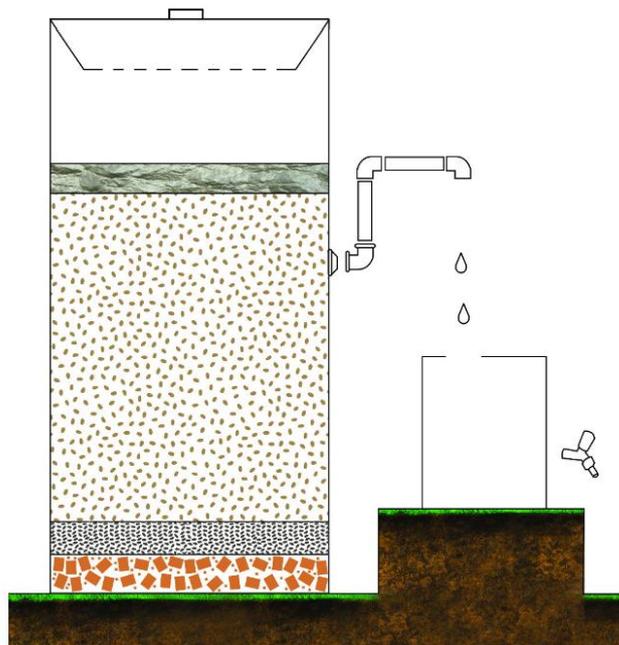
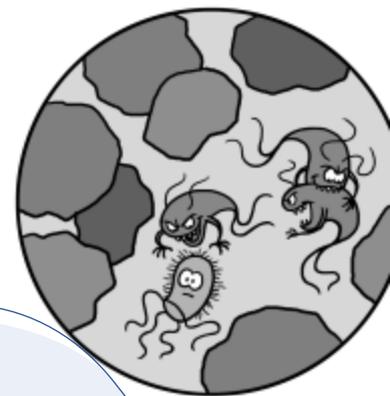


Figura 14: Biofiltro de pequeno porte

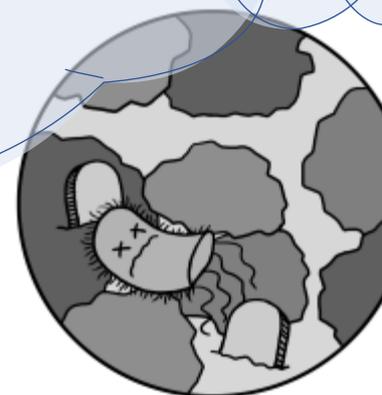
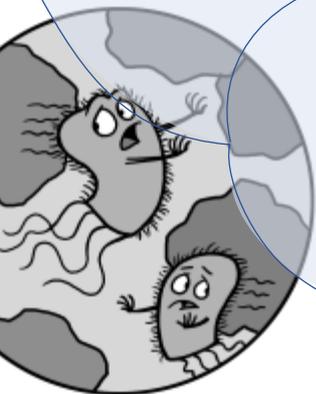


VOCÊ SABIA?

O biofiltro é preenchido com areia fina. Esse material facilita a filtragem lenta da água - daí o nome filtração lenta.

A filtragem lenta (vagarosa) da água também permite que micro-organismos se desenvolvam no topo da areia e ajudem na remoção de detritos e de vermes e parasitas da água. Daí o nome de biofiltro ou filtro biológico, devido aos mecanismos biológicos de atuação desses micro-organismos. Esses mecanismos são o que torna o biofiltro tão eficiente!^{2,4}

(Fonte das imagens: CAWST, 2012)



Posso beber a água filtrada do biofiltro?

O biofiltro, apesar de simples, é uma tecnologia muito eficiente no tratamento da água. É capaz de, em uma única etapa, remover cerca de 90% das impurezas e até 99,99% de alguns micro-organismos patogênicos – que causam diarreias e verminoses – da água^{2,3,4}!

Porém, recomenda-se sempre a **desinfecção** da água *após* a filtração. Isso vai garantir que a água esteja apropriada para o consumo humano, eliminando patógenos da água filtrada que não tenham sido removidos no filtro. A desinfecção da água pode ser feita através da fervura da água⁵, da adição de cloro⁵ ou da desinfecção solar (SODIS)⁶.



Para quem é o biofiltro?



A filtração lenta é uma tecnologia eficaz na remoção de impurezas e, por isso, pode ser utilizado para tratamento de água como etapa única², em locais onde não há rede centralizada de abastecimento de água, sendo apropriado especialmente para residências localizadas no meio rural, em áreas com aglomerações isoladas ou sem aglomerações¹.

Os filtros lentos de areia podem ser projetados para tratar a água de uma comunidade (solução coletiva) ou de uma única residência (solução individual)¹. Neste último caso, os biofiltros podem produzir grandes volumes de água filtrada todos os dias (acima de 500 litros) para atender a todas as demandas de água da família⁸. Assim, é necessário o uso de bombas, para levar a água bruta até o filtro, já que são grandes os volumes de água.

Mas os biofiltros podem também ser de pequeno porte, como da Figura 1, podendo ficar dentro de casa, sendo capazes de produzir baixos volumes de água filtrada (50 a 100 litros por dia) para as demandas básicas da família (água para beber, para lavagem das mãos e para o preparo de alimentos)⁷.



Os filtros lentos de areia são capazes de remover até 99,99% de micro-organismos patogênicos da água^{2,3,4}!

Vantagens da filtração lenta

- ▶ Pode ser usada mão de obra local (dos próprios usuários) para a montagem e operação dos biofiltros, desde que treinados e acompanhados por profissionais técnicos;
- ▶ Custos iniciais (para montagem do biofiltro) relativamente baixos e sem custos de operação e

de manutenção (não precisa de reposição de peças);

- ▶ Eficiente na remoção de impurezas, principalmente de vermes e parasitas^{2,3,4}, favorecendo a redução de taxas de doenças, como diarreia e verminoses intestinais^{9,10};
- ▶ Não precisa de tratamento prévio, para águas brutas com poucos sólidos em suspensão (turbidez abaixo de 10 uT, e por curtos períodos, de até 50 uT)^{2,7}.

Limitações da filtração lenta

- ▶ Somente adequado para fontes de água doce proveniente de rios, aquíferos ou da chuva, não sendo indicado para fontes de água com presença de matéria orgânica (cor verdadeira) nem para águas salobras¹;
- ▶ Se for de pequeno porte, requer abastecimentos diários manuais com água bruta, o que pode afetar as tarefas do dia a dia da família usuária, e se for de grande porte (individual ou coletivo), requer bombeamento (consumo de energia elétrica);
- ▶ Requer limpeza semanal das peças, o que demanda água limpa⁷.

Para saber mais

¹ Funasa (2019). Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR). Brasília/DF, 1ª edição, 2019. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica/-/asset_publisher/ZM23z1KP6s6q/content/programa-nacional-de-saneamento-rural-pnsr-?inheritRedirect=false>. Acesso em 12 jun 2022.

² Castaño, G.G.; Montero, J.L.; Visscher, J.T. (1999). Filtración em múltiples etapas – Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Projeto UNESCO "Promoción de actividades orientadas a la sostenibilidad en el sector de agua potable, saneamiento básico y conservación del medio ambiente. Santiago de Cali. ISBN: 958-8030-20-X.

³ Gottinger, A. M.; Mcmartin, D. W.; Price, D.; Hanson, B. (2011). The effectiveness of slow sand filter to treat Canadian rural prairie water. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 455-463.

⁴ Bellamy, W.D.; Silverman, G.P.; Hendricks, D.W.; Logsdon, G.S. (1985a). Removing Giardia Cysts With Slow

Sand Filtration. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 77, No. 2, Giardiasis: The New Waterborne Disease, 52-60.

⁵ Ministério da Saúde (2014). Cuidados com água para consumo humano. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/folder/cuidados_agua_consumo_humano_2014.pdf>. Acesso em 20dez2022.

⁶ Di Bernardo, L.; Brandão, C.C.S.; Heller, L. (1999). Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. PROSAB, Rio de Janeiro, 114p.

⁷ CAWST – Center for Affordable Water and Sanitation Technology. (2009). Biosand filter manual: Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance. A CAWST Training Manual, September 2009 Edition. Disponível em: <www.cawst.org>. Acesso em 7mar2022.

⁸ EMATER-MG. (2013). Leal, J.T.C.P.; Fernandes, M.R.; Pereira, R.T.G. Boas práticas ambientais na cafeicultura. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2013. 64 p. il.

⁹ Bernardes, R.S.; Costa, A.A.D.; Bernardes, C. (2018). Projeto Sanear Amazônia: tecnologias sociais e protagonismo das comunidades mudam qualidade de vida nas reservas extrativistas. *Desenvolv. Meio Ambiente*, v. 48, Edição especial: 30 Anos do Legado de Chico Mendes, p. 263-280, novembro 2018. DOI: 10.5380/dma.v48i0.58510. e-ISSN 2176-9109.

¹⁰ Liang, K.; Sobsey, M.; Stauber, C.E. (2010). Improving Household Drinking Water Quality: Use of BioSand Filters in Cambodia. WSP- Water and Sanitation Program. Disponível em: <https://scholarworks.gsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1075&context=iph_facpub>. Acesso em 24out2022.

*Obrigada e até mais!
Qualquer dúvida, entre em
contato:
cristiane_frizzo@yahoo.com.br*



ANEXO 3: Memorial de cálculo

A partir da definição da vazão de projeto adotada (Q), de 60 L/dia, e da taxa de filtração (taxa) adotada, calcula-se a área em planta (A_p) do biofiltro (Equação 1) e, conseqüentemente, o seu diâmetro (Equação 2) e a sua altura (Tabela 5.2).

$$taxa = \frac{Q}{A_p} \Rightarrow A_p = \frac{Q}{taxa} \quad (\text{Equação 1})$$

$$A_p = \frac{\pi \times D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times A_p}{\pi}} \quad (\text{Equação 2})$$

Para o cálculo da área em planta, considera-se a menor taxa de filtração aceitável (0,1 m³/m²/h), tal que as dimensões do biofiltro atendam à vazão de projeto mesmo operando com a taxa de filtração mínima. Assim, calcula-se uma área em planta de 0,025 m², empregando a (Equação 1).

O próximo passo é a determinação do diâmetro do biofiltro aplicando-se a **Error! Reference source not found.**, que resulta em 18 cm. Ressalta-se que este é o valor mínimo para que se tenha uma área em planta que atenda à demanda estabelecida para produção diária (60 L/d) e da taxa de filtração adotada (2,4 a 9,6 m³/m²/d). Portanto, pode ser adotado qualquer valor de diâmetro acima de 18 cm, observando-se que, quanto maior o biofiltro, maior a massa de areia e de pedregulho para seu preenchimento, o que pode aumentar custos e/ou dificultar a obtenção de material suficiente. Por outro lado, há também a possibilidade de maior produção de água filtrada. Feitas tais considerações, é adotado diâmetro de 30 cm, para maior estabilidade da estrutura e para que haja volume suficiente acima do nível mínimo de água (reservatório) para os abastecimentos regulares, garantindo-se a produção diária de água desejada. Com o novo diâmetro adotado, pode-se calcular a área em planta real, a partir da Equação 1.

Já a altura do biofiltro se dá pela soma das alturas adotadas para a camada suporte (h_p), o meio filtrante (h_a), a coluna de água (h_{NA}) e o reservatório interno de água bruta (h_r), conforme a Equação 3.

$$h = h_p + h_a + h_{NA} + h_r \quad (\text{Equação 3})$$

A Tabela 5.2, no item 5.1, mostra as alturas recomendadas e as funções de cada um desses componentes, justificando assim a altura adotada para cada camada. A altura do biofiltro totaliza, portanto, 85 cm. Cabe ressaltar que a determinação da altura do reservatório (juntamente com a adoção do diâmetro de 30 cm para o biofiltro) foi feita de forma a resultar um volume útil de aproximadamente 15 litros para o reservatório de água bruta, para que, em regime intermitente, seja possível a produção desejada, de 60 L/dia, com quatro abastecimentos diários.

Resumidamente, o biofiltro aqui projetado para produção diária de 60 L/dia deve ser constituído de PVC opaco, cilíndrico, com diâmetro de 30 cm e altura de 85 cm. Ademais, deve operar em regime intermitente, com abastecimentos de 15 litros a cada 6 horas. Isso resulta em uma taxa de filtração variável, com máxima de 0,4 m³/m²/h, o que equivale à vazão de 0,5 L/min. Em outras palavras, no início da carreira de filtração, com o meio filtrante limpo, o biofiltro tem a capacidade de produzir até 0,5 litro de água filtrada a cada minuto.

A Figura mostra resumidamente os cálculos feitos até aqui para o dimensionamento do biofiltro.

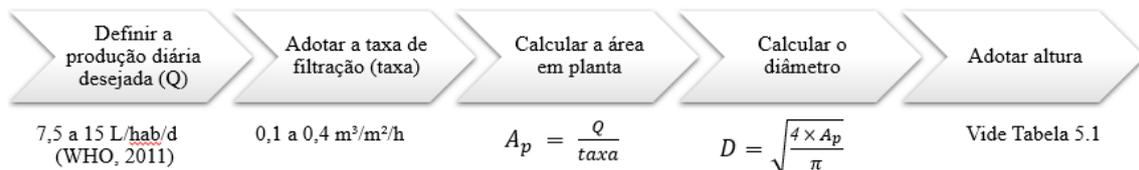


Figura 1: Sequência de cálculos para o dimensionamento do biofiltro

Quanto à quantidade de areia necessária, é recomendado que o biofiltro seja preenchido com, pelo menos, 50 cm de areia (seca), espessura mínima recomendada para o meio filtrante. Assim, para o cálculo do volume de areia necessário, para fins de orçamento e/ou aquisição de material, devem-se considerar as dimensões do biofiltro (área em planta A_p) e a altura da camada de areia (h_a). O volume de areia (V_a) será dado então pela Equação 4.

$$V_a = A_p \times h_a \quad \text{(Equação 4)}$$

Com $A_p = 0,07 \text{ m}^2$ e $h_a = 0,5 \text{ m}$, tem-se que $V_a = 0,035 \text{ m}^3$ ou 35 L. Esse valor é consistente com biofiltros do mesmo porte, como o da CAWST (2009) e da DESEA Peru (2017), que utilizam 39,2 e 30 litros de areia, respectivamente.

Assim, para o biofiltro aqui proposto, serão necessários aproximadamente 52,5 kg de areia fina, tendo em vista a Equação 5.

$$m_a = V_a \times \gamma \quad (\text{Equação 5})$$

Onde m_a é a massa da areia seca (kg); V_a é o volume de areia já calculado (m^3); e γ é o peso específico aparente da areia seca (que pode ser considerada igual a 1.500 kg/m^3 , para areia fina seca com granulometria de até 1 mm, segundo a FGV, 2017).

O volume e a massa de material necessários para a camada suporte podem ser estimados pelas Equações 4 e 5, respectivamente, substituindo h_a (espessura da camada de areia) por h_c (espessura da camada de pedregulho), isto é, 5 cm. Considerando-se o peso específico aparente do pedregulho de 1500 a 1800 kg/m^3 (FGV, 2017), estima-se a necessidade de 3,5 litros de cada pedregulho, o que equivale a aproximadamente 6 kg de cada.