

# Potabilização de água da chuva por ultrafiltração

## *Ultrafiltration of rainwater to produce drinking water*

Taizi Miorando<sup>1</sup>, Vandr e Barbosa Bri o<sup>2</sup>, Laisa Girardelli<sup>3</sup>

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi utilizar a ultrafiltra o (UF) para o tratamento de água de chuva, ajustando seus parâmetros físico-químicos e microbiológicos para a potabilidade. Para tal, duas membranas de UF foram testadas em duas pressões diferentes para tratar água de chuva coletada em um prédio da Universidade de Passo Fundo (UPF). A  gua de chuva apresentou uma moderada concentra o de sólidos suspensos, cor, turbidez, matéria orgânica e contamina o por coliformes e uma baixa concentra o de nitritos, nitratos e sulfatos. As duas membranas de UF utilizadas (com diâmetro de corte de 4 e 50 kDa) permitiram o ajuste desses parâmetros   potabilidade, sendo que a membrana de 50 kDa de fibra oca apresentou fluxos superiores a 130 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> (a 2 bar). Logo, a capta o de água de chuva e sua UF   uma promissora alternativa para um abastecimento descentralizado de água potável.

**Palavras-chave:**  gua da chuva; separa o por membranas; água potável.

### ABSTRACT

The aim of this work was to use the ultrafiltration (UF) for the treatment of rainwater, adjusting their physicochemical and microbiological parameters for the drinking water quality. Two UF membranes were tested at two different pressures to treat the rainwater collected in a building of the University of Passo Fundo. Rainwater showed a moderate concentration of suspended solids, color, turbidity, organic matter and coliform contamination and a low concentration of nitrites, nitrates and sulfates. The two UF membranes used (with molecular weight cutoff of 4 and 50 kDa) allowed the adjustment of these parameters to the potability, and the permeate flux of hollow fiber (50 kDa) membrane was above 130 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> (at 2 bar). Therefore, rainwater harvesting and its UF is a promising alternative for a decentralized supply of drinking water.

**Keywords:** rainwater; membrane separation; drinking water.

## INTRODU O

Com o crescimento da demanda de água potável e uma vez que os mananciais de água superficial e subterrânea não mais suprem as necessidades de abastecimento da popula o,   necessária a utiliza o de fontes alternativas de capta o. A escassez de água   uma realidade em todo o mundo, seja por indisponibilidade quantitativa ou qualitativa. A busca de fontes alternativas, reuso de água e outros mecanismos para a seu emprego racional   uma tendência global (MOREIRA NETO *et al.*, 2012).

Quando se fala em escassez econ mica, são levados em considera o os custos para aquisi o da água em fontes tradicionais. As  guas obtidas de fontes superficiais geram custos para o devido tratamento nas Esta es de Tratamento de  guas (ETAS). As  guas de fontes subterrâneas têm custos agregados com perfura o de

poços, prote o fitossanitária, bombeamento e manuten o. Outro problema dessas fontes   a contamina o dos aq feros, não somente por poluentes, mas têm também pela água do mar quando os aq feros são litorâneos.

O Brasil concentra um grande volume de recursos hídricos; contudo, apresenta uma grande varia o climática, espacial e temporal das vazões. As bacias localizadas em áreas que apresentam uma combina o de baixa disponibilidade e grande utiliza o dos recursos hídricos passam por situa es de escassez e estresse hídrico, necessitando de intensas atividades de planejamento e gestão de recursos hídricos. A grande variabilidade climática e de concentra o da popula o se reflete em extremos: os estados que abrangem a região amazônica concentram em torno de 80% da disponibilidade total de recursos hídricos, enquanto o restante do país conta com menos de 20%, sendo

<sup>1</sup>Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade de Passo Fundo (UPF) - Passo Fundo (RS), Brasil.

<sup>2</sup>Doutor pela Universidade Estadual de Maringá (UEM) - Maringá (PR), Brasil. Professor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da UPF - Passo Fundo (RS), Brasil.

<sup>3</sup>Estudante de Engenharia de Alimentos na Universidade de Passo Fundo (UPF) - Passo Fundo (RS), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Vandr e Barbosa Bri o - Campus I - BR 285 - São José - 99052-900 - Passo Fundo (RS), Brasil - E-mail: vandre.briao@gmail.com.

**Recebido:** 10/03/15 - **Aceito:** 13/06/16 - **Reg. ABES:** 146765

que mais de 50% da população se concentra nas regiões sul e sudeste (ANA, 2012; IBGE 2010).

A Lei nº 9.433/97 (BRASIL, 1997) institui o planejamento e conservação dos recursos hídricos e prima pela preservação e uso consciente das fontes de água. Nessa abordagem de conservação, a água de chuva, escoada sobre edificações, carrega contaminantes que prejudicam a sua qualidade, dificultando o seu uso como água potável. Geralmente, apresenta qualidade que atende à maior parte dos padrões de potabilidade, estabelecida pela Portaria 2.914 de 2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Essa legislação dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, condição que incentivam o esforço para transformar tal água para usos potáveis.

O aproveitamento da água da chuva representa uma fonte promissora para abastecimento. Porém, a chuva coletada em telhados é, normalmente, usada para fins não potáveis, como descargas em bacias sanitárias ou rega de jardins. Entretanto, essa água detém grande potencial em função das áreas de telhados e do consumo de água de que necessitam o abastecimento público e os mais variados tipos de processos produtivos (FENDRICH; OLYNIK, 2002).

Essa crescente preocupação da sociedade com os recursos hídricos levou a diferentes tentativas de usar a água da chuva, pois é uma fonte que proporciona um abastecimento sustentável em áreas urbanas e isola a situações extremas de escoamento nos cursos. No entanto, a água da chuva contém quantidades substanciais de contaminantes, incluindo partículas, microrganismos, metais pesados, e produtos orgânicos e não pode ser utilizada sem tratamento adequado (KIM; LEE; KIM, 2005). O nível de tratamento aplicado depende principalmente do uso a que se destina (potável ou não) e da qualidade da água da chuva recolhida a partir de telhados ou outras superfícies (HELMREICH & HORN, 2009).

Baseado na necessidade da criação de sistemas que possam reunir baixo custo de manutenção e facilidade de operação para que se tornem atraentes, os processos de separação por membranas representam um novo e importante conjunto de métodos de tratamento para obtenção de água potável.

Uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas etapas. A eficiência de filtração depende da qualidade da água da chuva, nominal tamanho de poro do filtro, condições de filtração, e o modo de operação (KIM *et al.*, 2007). A aplicação de membranas de ultrafiltração pode representar um tratamento eficiente e de baixo custo para o tratamento, pois possuem características consideráveis de remoção de patógenos e outros contaminantes que diminuem a qualidade da água da chuva (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a água de chuva armazenada a partir da coleta em telhado e submetê-la ao processo de ultrafiltração (UF) em várias condições experimentais para torná-la potável.

## METODOLOGIA

### Etapas

O trabalho foi desenvolvido através das seguintes etapas:

1. ultrafiltração tangencial em duas pressões de operação e dois tipos de membrana;
2. experimentos de longa duração com a membrana de melhor desempenho na etapa anterior para avaliação da estabilidade da qualidade da água e do fluxo permeado.

### Água de Chuva

As amostras de água de chuva foram obtidas junto ao prédio do Centro Tecnológico (CETEC) da Universidade de Passo Fundo (UPF), localizado em Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil (coordenadas: 28°13'38.52"S e 52°23'11.74"O). A captação foi realizada em uma parte do telhado de fibrocimento com 50 m<sup>2</sup> de área. O direcionamento da água é realizado pelas calhas e conduzido a dois reservatórios de armazenamento (2.500 e 5.000 L de capacidade, em polipropileno) dispostos em série. A coleta foi realizada no primeiro tanque sem o descarte de primeira chuva. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipientes de polietileno e transportadas até o laboratório.

Foram realizadas 6 coletas seguidas dos ensaios durante o período de 25 de março a 9 de outubro de 2014. As águas 2, 3, 4 e 5 foram utilizadas para os experimentos de ultrafiltração tangencial e a amostra 6 foi dividida em 2 alíquotas e utilizada para os experimentos de ultrafiltração submersa.

### Caracterização físico-química e microbiológica das amostras

As amostras de água de chuva e permeado foram caracterizadas quanto aos parâmetros: cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza, nitratos, nitritos, sulfatos, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos sedimentáveis. Utilizou-se a categorização da *American Public Health Association* (APHA; AWWA; WEF, 2000). A concentração de matéria orgânica foi realizada pelo método de oxidação com permanganato de potássio (segundo a norma NBR 10739/89 — ABNT, 1989). Os ácidos húmicos foram analisados através do método de absorvância UV a 254 nm, baseado em Li *et al.* (2011). *Escherichia coli* e coliformes totais foram determinados por meio de placas Petrifilm (fornecidos pela 3M do Brasil).

Foi calculado o coeficiente de rejeição (R), para cada parâmetro analisado: conforme a Equação 1:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) * 100 \quad (1)$$

Sendo:

$C_p$  e  $C_0$  as concentrações dos parâmetros avaliados no permeado e na alimentação, respectivamente.

## Ultrafiltração tangencial

Para essa etapa, foi utilizado um equipamento de bancada tangencial conforme ilustrado na Figura 1. As vazões utilizadas nessas filtrações foram de 200 L.h<sup>-1</sup>.

Foram utilizadas duas membranas com diferentes características de material e tamanho de poro, descritas no Quadro 1.

As membranas passaram por limpeza química antes de cada experimento. Essa foi realizada com solução alcalina (pH 10,5) de hidróxido de sódio, e sanitização utilizando-se uma solução de hipoclorito de sódio (concentração de 500 mg.L<sup>-1</sup>). Esses procedimentos também foram realizados após as filtrações.

O equipamento é composto por um reservatório de aço inoxidável de 10 L de capacidade e uma bomba pneumática para alimentação da água na carcaça da membrana como representado na Figura 1. A água da chuva foi alimentada no tanque e impulsionada pela bomba através da membrana, separando o permeado (água tratada) e o rejeito. Ambas correntes foram recirculadas para o tanque de alimentação, mantendo o volume constante durante o tempo de operação. Com o auxílio de uma válvula de diafragma, era ajustada a pressão de operação e as vazões de retido e permeado lidas em rotâmetros instalados nessas linhas. As filtrações foram realizadas a temperatura ambiente.

Todos os experimentos foram realizados em duplicata. Ao final da filtração tangencial, foram coletadas amostras do permeado e conduzidas análises físico-químicas e microbiológicas, realizadas em triplicatas

para averiguar a eficiência do processo e a influência das diferentes condições experimentais.

## Equipamento de filtração submersa

Para verificar a qualidade do fluxo de permeado ao longo do tempo em experimentos de maior duração, foi utilizado um equipamento de bancada que trabalha com membranas submersas e sob vácuo, com a membrana que apresentou o melhor desempenho na primeira etapa do trabalho.

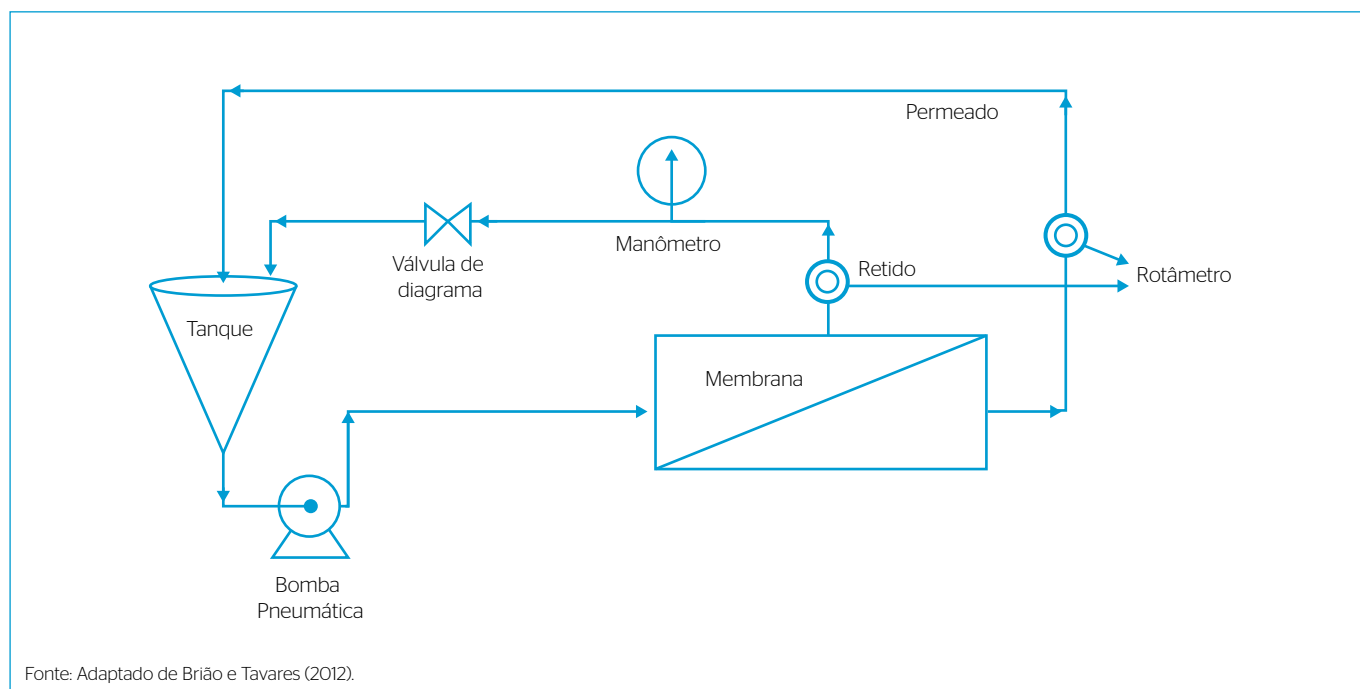
A membrana utilizada possui peso molecular de corte de 50.000 Da (de polietersulfona em configuração de fibra oca e área filtrante de 0,22 m<sup>2</sup>). O procedimento foi realizado com o auxílio de uma bomba de vácuo, filtrando da parte externa para o interior da membrana.

O equipamento utilizado nessa etapa é ilustrado na Figura 2.

A água da chuva foi alimentada no tanque onde está instalada a membrana. Uma bomba de vácuo é responsável por aplicar pressão

**Quadro 1 - Características das membranas utilizadas.**

| Membrana | Material                     | Diametro de corte (Dalton) | Área Filtrante      | Configuração |
|----------|------------------------------|----------------------------|---------------------|--------------|
| 1        | Polietersulfona              | 50.000 Da                  | 0,32 m <sup>2</sup> | Fibra oca    |
| 2        | Cerâmica (Óxido de Zircônia) | 4.000 Da                   | 0,10 m <sup>2</sup> | Tubular      |



**Figura 1 - Diagrama do equipamento de filtração tangencial.**

negativa no sistema, forçando o permeado a passar para interior da membrana e direcionada para o tanque de vácuo, e separado para o tanque de permeado. A vazão de permeado foi medida com o auxílio de um rotâmetro. O experimento foi realizado com vácuo de 0,4 bar (pressão máxima alcançada pelo equipamento).

Os testes foram realizados durante 8 h. Após o fluxo decair cerca de 50% do valor inicial (o que ocorria em cerca de 120 minutos), foi realizada a retrolavagem, abrindo-se a válvula que obstrui a linha de retrolavagem, fechando-se a válvula de acesso da linha de permeado e acionando-se a bomba de retrolavagem. Esse procedimento foi realizado durante 2 minutos e promovendo assim a remoção do material aderido na superfície da membrana. Após a retrolavagem, foi reiniciada a filtração. O volume total de permeado foi coletado no tanque de permeado e caracterizado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização da Água da Chuva

Os resultados da caracterização das seis amostras de água de chuva coletadas estão apresentados na Tabela 1. Essas amostras foram coletadas durante os meses de março a outubro de 2014.

Os valores da Tabela 1 mostram que a água de chuva não apresentou valores elevados ou problemáticos para que seja destinada ao consumo humano, tais como pH, alcalinidade, dureza, nitratos, nitritos, sulfatos e sólidos totais. No entanto, as médias apresentadas na Tabela 1 mostram valores moderados de cor, turbidez, matéria orgânica, sólidos suspensos e sedimentáveis. Além disso, todas as amostras apresentaram contaminação por coliformes totais e *Escherichia coli*. Esses parâmetros excedem a qualidade sugerida para consumo humano constante nas prerrogativas da Portaria 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) e das Diretrizes da Comunidade Europeia (CEU, 1998) e da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011), usadas como base para este estudo.

Nota-se também que os desvios padrão da maioria dos parâmetros foi elevado, o que demonstra que a qualidade da água de chuva é variável, e nem sempre atende aos requisitos de potabilidade. Logo, um processo eficiente deve ser instalado para garantir o ajuste da qualidade antes do consumo humano.

Jaques (2005) analisou água da chuva em Santa Catarina e atribuiu o aumento do pH pelos telhados à presença de partículas depositadas na superfície dos mesmos. O autor verificou que o pH da água coletada em um telhado de cimento amianto foi de 7,35. Do mesmo modo, Guedes (2012) encontrou valores de pH na faixa

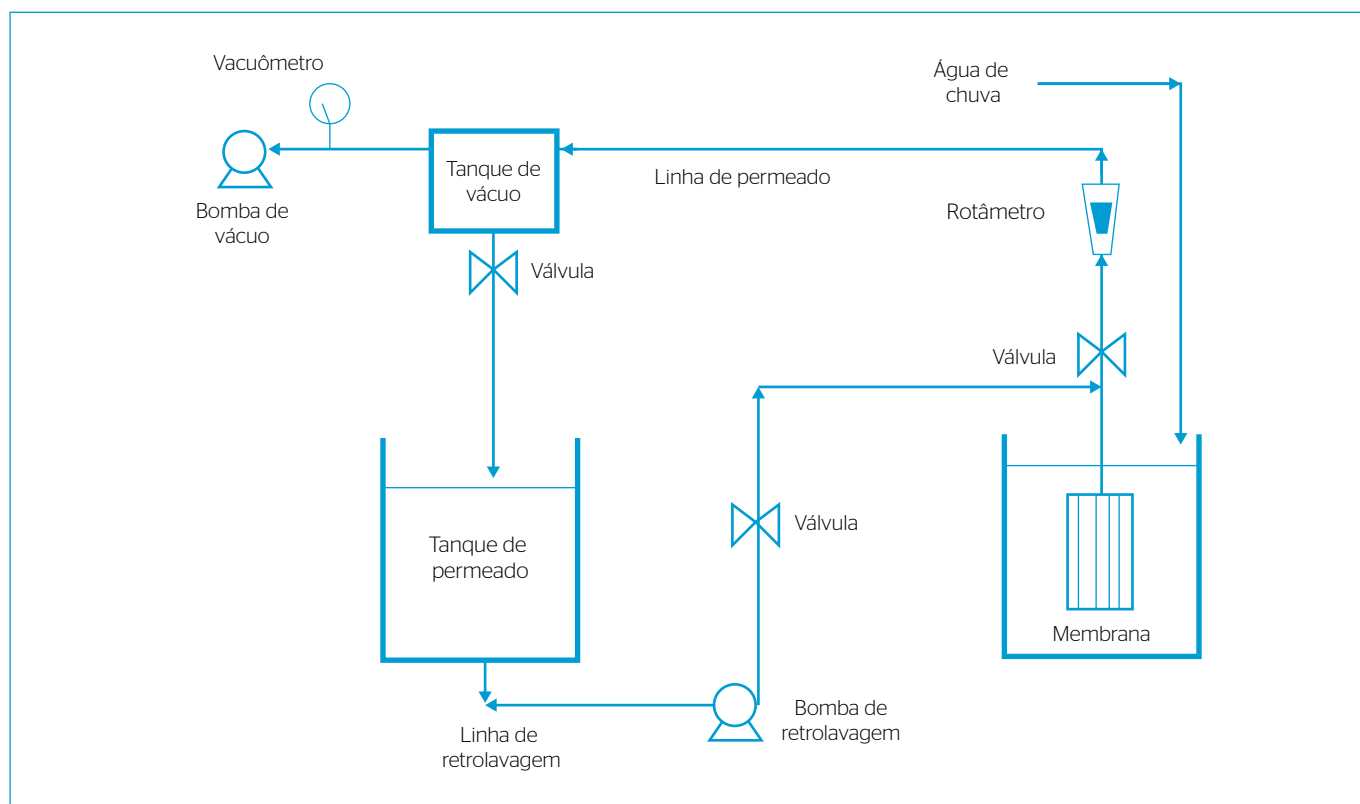


Figura 2 - Diagrama do equipamento de ultrafiltração submersa.

de 6,0 e 7,5. Esses valores, assim como valores os encontrados neste trabalho, se encontram dentro da faixa estabelecida para água potável ( $6,0 \leq \text{pH} \leq 9,5$ ).

Em amostras de água de chuva do Departamento de Química da Universidade de Analítica (Turim, Itália) foram encontrados valores de pH da água de chuva na faixa de 4,4 e 6,6. Quanto à condutividade, espera-se que a água de chuva apresente baixos valores devido à menor concentração de sólidos dissolvidos. Os valores de condutividade apresentados por Albinet *et al.* (2009) variaram entre 4,5 e 63,5  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ .

A quantidade de matéria orgânica muitas vezes não é adotada nas pesquisas sobre qualidade da água da chuva, mas é um importante indicador que avalia a capacidade que a água tem para consumir oxidantes químicos. Os valores deste trabalho não são considerados altos; porém, a Diretiva Europeia 98/83/EC (CEU, 1998) limita a concentração de matéria orgânica em águas para consumo humano em 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , o que torna a água de chuva coletada nos telhados da Universidade de Passo Fundo imprópria para uso potável. A remoção da matéria orgânica também tem importância para reduzir a potencial formação de trihalometanos, se a água for submetida a desinfecção com cloro (VARBANETS *et al.*, 2009).

Nitritos, nitratos e sulfatos estão presentes devido à contaminação atmosférica em regiões de intensa urbanização ou industrializadas. Outras pesquisas que abordaram as concentrações de nitrito, nitrato e sulfato são apresentadas na Tabela 2.

Assim, como em outras pesquisas com água da chuva, as concentrações de nitrito, nitrato e sulfato são baixas, indicando que, no local da coleta, ela não sofre influência das condições atmosféricas sobre sua qualidade. A região da cidade de Passo Fundo não é intensamente industrializada; portanto, não tem níveis elevados de nitrito, nitratos e sulfatos ocasionados por indústrias ou grandes fluxos de veículos. O município também possui um entorno exclusivamente agrícola o que contribui para uma chuva com qualidade razoável sem características ácidas e/ou de degradação.

## Rejeição e fluxo de permeados de filtração tangencial

Na Tabela 3 apresenta-se os resultados dos ensaios obtidos no equipamento de ultrafiltração tangencial realizados com as membranas de configuração fibra oca e tubular, com pressões de 1 e 2 Bar.

**Tabela 2 - Comparativo de concentrações de nitrato e sulfato por outros autores.**

| Parâmetro          | Belo Horizonte (MG) | São Paulo (SP)            | Candiota (RS)                   | Ilha Grande (RJ)           |
|--------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| $\text{NO}_3^-$    | 12,00               | 21,20                     | 5,22                            | 12,00                      |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 12,60               | 12,60                     | 5,22                            | 12,00                      |
| Autor              | Figueiredo, 1999    | Leal <i>et al.</i> , 2004 | Migliavaca <i>et al.</i> , 2005 | Souza <i>et al.</i> , 2006 |

Fonte: Fornaro & Gutz (2006).

**Tabela 1 - Caracterização das seis amostras de água de chuva coletadas.**

| Parâmetro  | 1    | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | Média e Desvio Padrão |
|--|------|-------|------|------|------|------|-----------------------|
| Cor (Hz)   | 3    | 16    | 24   | 16   | 19   | 30   | 21,000±5,370          |
| Turbidez (NTU)   | 0,7  | 4,9   | 38   | 22   | 25,3 | 65   | 31,050±19,980         |
| pH   | 7,59 | 7,42  | 6,91 | 6,82 | 6,67 | 7,15 | 7,130±0,330           |
| Cond. Elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                | 12,3 | 39,5  | 31   | 33   | 10,2 | 20   | 31,000±10,820         |
| Alcalinidade ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3$ )  | 9,33 | 16,66 | 40   | 8    | 18   | 15   | 15,830±11,540         |
| Dureza ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3$ )        | 7,1  | 11,8  | 10,1 | 9    | 3,7  | <2   | 9,000±2,430           |
| Matéria Orgânica ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de $\text{O}_2$ ) | 1,1  | 5,5   | 11,6 | 11,3 | 10,4 | 8,6  | 9,540±4,010           |
| Ácidos Húmicos (absorbância a 254 nm)                              | NR   | NR    | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,030±0,005           |
| Nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )                         | ND   | ND    | ND   | ND   | ND   | ND   | 0,275±0,115           |
| Nitritos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )                         | ND   | 0,1   | 0,25 | ND   | 2,4  | 3,9  | 0,250±1,580           |
| Sulfatos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )                         | 7,9  | 8,1   | 13,2 | 21,1 | 15,9 | 5,6  | 10,650±5,361          |
| Sólidos Suspensos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )                | 290  | 130   | 351  | 73   | 68,5 | 501  | 210,000±143,200       |
| Sólidos Sedimentáveis ( $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ )            | 0,9  | 0,5   | 1    | 0,4  | 0,95 | 2    | 0,900±0,451           |
| <i>E. coli</i> (UFC/mL)  | 4    | 53    | 6    | 8    | 5    | 2    | 6,000±19,130          |
| Coliformes Totais (UFC/mL)   | 271  | 210   | 245  | 315  | 266  | 247  | 256,500±34,560        |

NR: Não Realizado; ND: Não Detectável.

A análise da Tabela 3 mostra que a ultrafiltração permitiu fazer os ajustes dos aspectos físico-químicos e microbiológicos que excediam os limites de potabilidade abordados nas legislações brasileira (BRASIL, 2011) e da comunidade Europeia (CEU, 1998). A ultrafiltração removeu cor, turbidez, matéria orgânica, sólidos suspensos e sedimentáveis com boas rejeições, eliminando também aspectos de contaminação microbiológica da água de chuva. Quanto aos aspectos físicos de cor, turbidez e sólidos, foram obtidas rejeições acima de 87,5%, chegando até 100%. Os aspectos relacionados à presença de matéria orgânica (matéria orgânica e ácidos húmicos) foram removidos na ordem de 57,19 até 96,67%. Essas rejeições foram suficientes para o ajuste da qualidade da água para um nível de segurança em que a água se ajuste ao consumo humano.

Drewes, Reinhard e Fox (2003) estudaram o desempenho de rejeição de compostos orgânicos com membranas. O autor observou permeação até mesmo em membranas de nanofiltração e osmose inversa, indicando que esses compostos possuem tamanho pequeno e são, portanto, de difícil remoção. Porém, as remoções desses compostos da água da chuva com a ultrafiltração foi superior a 90%, ajustando sua qualidade para o uso potável.

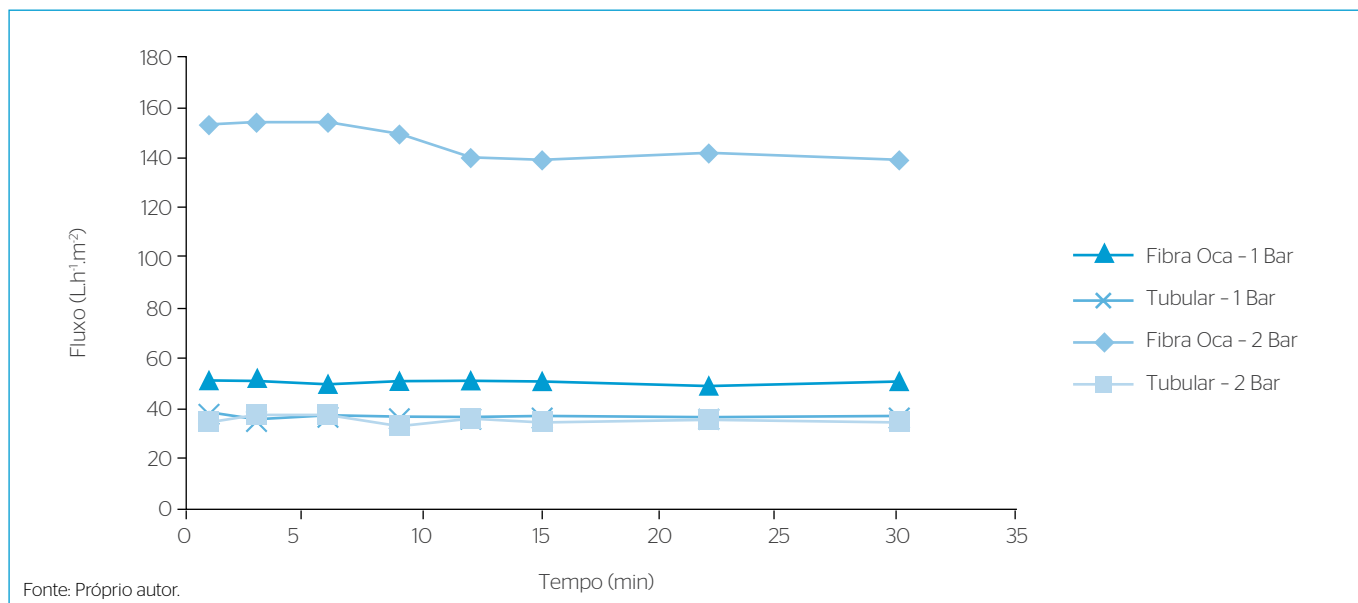
As membranas apresentaram comportamentos semelhantes de rejeição, não demonstrando interferência da pressão nas características do permeado final. No entanto, a membrana de configuração fibra oca com maior tamanho de corte de apresentou um maior fluxo de permeado, conforme apresentado na Figura 3.

Duas observações podem ser retiradas da Figura 3: o comportamento ao longo do tempo e o valor final de fluxo (após 30 min). Após 30 min,

**Tabela 3 - Caracterização dos permeados das filtrações tangenciais.**

| Parâmetro/membrana                          | Fibra Oca 1 bar | Tubular 1 bar | Fibra Oca 2bar | Tubular 2 bar | Limites               |
|---|-----------------|---------------|----------------|---------------|-----------------------|
| Cor (Hz)                                    | 2,0             | 0,0           | 2,5            | 1,0           | 15,0                  |
| Turbidez (NTU)                              | 0,50            | 0,0           | 0,07           | 0,06          | 5,0                   |
| Matéria Orgânica (mg.L <sup>-1</sup> )      | 0,465           | 1,330         | 2,800          | 4,850         | 5 mg.L <sup>-1*</sup> |
| Ácidos Húmicos (Abs. 254 nm)                | NR              | NR            | 0,001          | 0,001         | NA                    |
| Sólidos Suspensos (mg.L <sup>-1</sup> )     | ND              | ND            | ND             | ND            | NA                    |
| Sólidos Sedimentáveis (mg.L <sup>-1</sup> ) | ND              | ND            | ND             | ND            | NA                    |
| <i>E. coli</i> (UFC/100 mL)                 | ND              | ND            | ND             | ND            | Aus. em 100 ml        |
| Coliformes totais (UFC/100 mL)              | ND              | ND            | ND             | ND            | Aus. em 100 ml        |

\*Diretiva 98/83/EC da Comunidade Europeia; NA: Não Aplicável; NR: Não Realizado; ND: Não detectado pelo método analítico; Abs: Absorbância; Aus: Ausência.



**Figura 3 - Fluxo de permeado das filtrações tangenciais.**

observam-se dois patamares de valores de fluxo: um primeiro, na faixa de 40 a 50 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, e um segundo, na ordem de 140 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. Nota-se que a elevação da pressão não aumentou o fluxo da membrana tubular, enquanto esse valor foi quase triplicado na membrana de fibra oca quando se duplicou a pressão de 1 para 2 bar. Evidencia-se que, já que a membrana de configuração fibra oca possui maior tamanho de poros, apresenta maior fluxo de permeado.

O comportamento do fluxo permite observar se houve acúmulo excessivo de material particulado/suspensão/coloidal na membrana ao longo do tempo. O tempo de experimento foi de 30 minutos para todas as condições, e nesse tempo de operação, os fluxos se mantiveram relativamente estáveis (Figura 3), demonstrando que não ocorreu acúmulo significativo de material na membrana.

Experimentos de curto período fornecem características importantes sobre a qualidade do permeado e a rejeição da membrana, mas experimentos devem ser realizados com maiores períodos para uma melhor observação da estabilidade do processo de filtração ao longo do tempo para futuras aplicações da UF para tratamento de água de chuva. Por esse motivo, foram realizados experimentos por períodos mais prolongados com a membrana de fibra oca (50 kDa), pois a mesma apresentou rejeições semelhantes à membrana de tubular (4 kDa), mas obteve-se um maior fluxo permeado nas duas pressões testadas. Deve-se ressaltar que o fluxo permeado é a resposta de importância econômica, pois a ampliação de escala é baseada em cima dessa variável.

### Rejeição e fluxo de ultrafiltração submersa

Na sequência, foram realizados ensaios de ultrafiltração de longo período com membrana submersa de fibra oca. Essa alternativa de configuração representa fácil aplicação em maiores escalas, pois permite que a membrana seja introduzida nos tanques de armazenamento de águas de chuva já existentes em algumas residências e possibilita a

retrolavagem com a recuperação do volume utilizado. Os resultados de rejeição obtidos nessa etapa estão na Tabela 4.

Todos os contaminantes considerados críticos que excediam os padrões para potabilidade (Tabela 1) foram removidos de forma semelhante aos experimentos de curta duração. As rejeições da membrana permitiram ajustar a qualidade da água para valores inferiores aos limites para consumo humano, qualificando-a como potável. A rejeição de matéria orgânica foi de 58%, mas esse valor foi suficiente para reduzir o parâmetro para patamares inferiores a 5 mg.L<sup>-1</sup>, considerado o limite para potabilidade pela Diretiva Europeia. Além disso, a rejeição foi de 100% para sólidos suspensos e sedimentáveis, promovendo, com isso, uma remoção também da turbidez da água a valores quase nulos. O material húmico da água de chuva coletada para esses experimentos também foi baixo, e a UF promoveu uma redução na ordem de 50% do seu valor inicial. Além disso, houve uma remoção total de contaminação microbiológica (considerando o limite de detecção dos métodos), demonstrando que o processo de UF pode ser uma técnica eficiente e segura para a obtenção de água potável a partir de água de chuva.

A partir de concentrações obtidas com os permeados de ultrafiltração submersa, é possível observar que, além da fácil aplicação, essas membranas possuem grande potencial de produção de água potável.

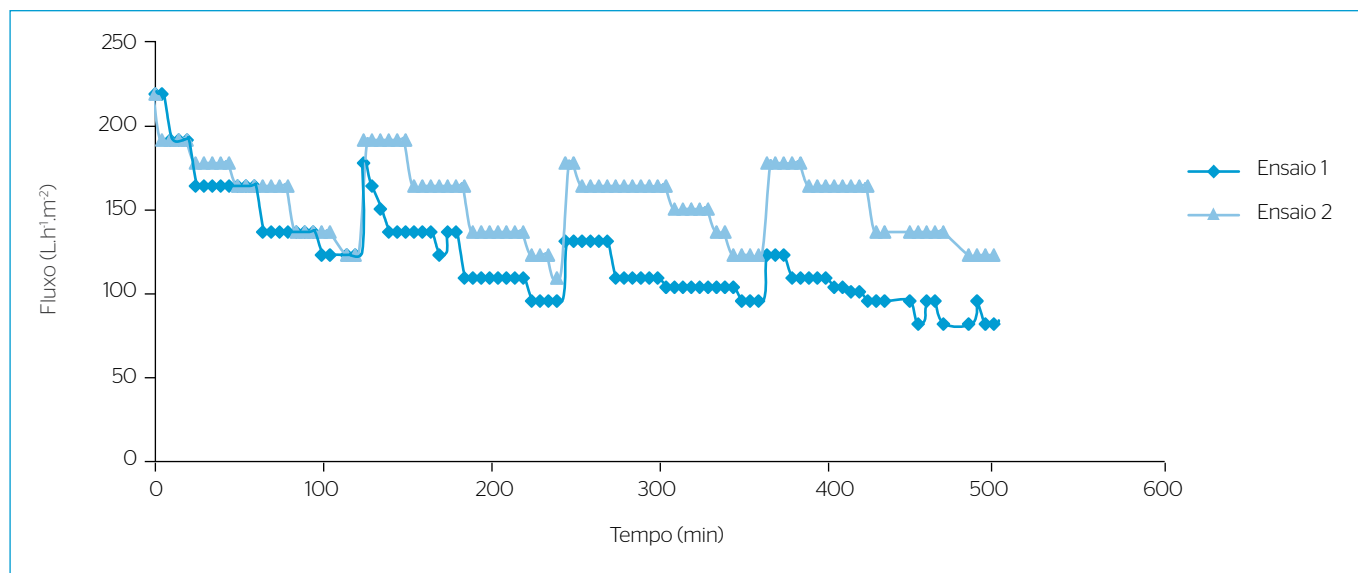
O comportamento do fluxo permeado ao longo do tempo de filtração (Figura 4) demonstra que ocorre depósito de material na membrana, mas as retrolavagens são capazes de remover os sólidos depositados, recuperando boa parte do fluxo inicial. Mostra também que, nesse tempo de teste, a membrana opera de forma satisfatória e permite a obtenção de uma água tratada com qualidade segura para consumo humano, demonstrando o potencial do uso dessa tecnologia para a produção de água potável.

A Figura 4 mostra uma queda acentuada do fluxo permeado, em tese pelo acúmulo de material suspenso e sedimentável na superfície da membrana. Ambos os ensaios apresentaram comportamento semelhante,

**Tabela 4 - Concentração dos permeados obtidos nos ensaios de ultrafiltração com membrana submersa de fibra oca de 50 kDa.**

| Parâmetro                                   | Água de chuva | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Limites para potabilidade* |
|---|---------------|----------|----------|----------------------------|
| Cor (Hz)                                    | 30            | 2        | 2        | 15                         |
| Turbidez (NTU)                              | 65,00         | 0,04     | 0,06     | 5                          |
| Matéria orgânica (mg.L <sup>-1</sup> )      | 8,60          | 3,56     | 3,56     | 5**                        |
| Ácidos húmicos (Abs. 254 nm)                | 0,040         | 0,003    | 0,003    | NA                         |
| Sólidos suspensos (mg.L <sup>-1</sup> )     | 501           | ND       | ND       | NA                         |
| Sólidos Sedimentáveis (mL.L <sup>-1</sup> ) | 2             | ND       | ND       | NA                         |
| <i>E. coli</i> (UFC/100 mL)                 | 2             | ND       | ND       | Aus. em 100 mL             |
| Coliformes totais (UFC/100 mL)              | 247           | ND       | ND       | Aus. em 100 mL             |

\*Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde; \*\*Diretiva 98/89 da Comunidade Europeia; NA: Não Aplicável; ND: Não detectado pelo método analítico; Abs: Absorbância; Aus: Ausência.



**Figura 4** - Fluxo permeado obtido nos ensaios de ultrafiltração de longo período com membrana de fibra oca submersa no tanque.

com uma queda de fluxo na ordem de 40 a 50% após 8 h de operação. Essa diferença possivelmente aconteceu devido à diferença de concentração de sólidos suspensos nas duas amostras utilizadas. Uma alternativa para uma eficiente retrolavagem seria realização de purga dos sólidos no fundo do tanque quando sedimentados. Em testes feitos com membranas de microfiltração para tratamento de água de chuva, Guedes (2012) observou redução de fluxo permeado superior a 70% após 40 min. Logo, além de ajustar a qualidade da água de chuva para padrões de potabilidade, a ultrafiltração apresenta menor redução de fluxo e, consequentemente, maiores taxas de produção que membranas de microfiltração.

O volume permeado obtido ao final de 8 h foi de 56 L e foram realizadas 4 retrolavagens de 2 L (somando 8 L nas retrolavagens). Logo, um volume líquido de água produzida seria de 48 L. O volume utilizado nas retrolavagens foi de 14%. Contudo, essa água de retrolavagens retorna ao tanque, não havendo descargas externas ao sistema. No entanto, uma purga no fundo do tanque deveria ser utilizada para o descarte dessa massa de material suspenso/sedimentável/coloidal, que promove a redução de fluxo. Poderia ser instalada uma caixa de sedimentação na montante do reservatório no qual é inserida a membrana de ultrafiltração, mas isso demandaria mais um equipamento a ser instalado. Acredita-se que a instalação da membrana afastada cerca de 10 cm do fundo do tanque, associada com uma purga periódica no fundo do reservatório, permitiria uma menor redução do fluxo permeado.

Teixeira (2011) verificou que os efeitos da colmatação são mais significativos para a água bruta do que para a decantada, devido à sua pior qualidade, maior turbidez e quantidade em ácidos húmicos. Esses resultados apontam para a necessidade de um pré-tratamento à UF, podendo-se realizar uma sedimentação a montante da mesma. No entanto, deve ser

destacado que nossos experimentos foram realizados com a água do primeiro tanque de coleta da água de chuva, não havendo o descarte dos primeiros milímetros de chuva. Isso foi realizado para um melhor aproveitamento da água de chuva, pois, mesmo que um pequeno volume de chuva precipite, pode-se aproveitar o mesmo tratando-o por ultrafiltração, não havendo a necessidade de pré-tratamento e atingindo-se todos os limites para consumo humano dessa água.

O tratamento de águas superficiais (utilizando coagulação/floculação) em ETAS torna-se viável a partir de um maior volume de água tratada, pois há a necessidade de adição de produtos químicos, tanques para sedimentação e filtros de areia. A ultrafiltração pode ser uma opção para abastecimento descentralizado de águas, uma vez que áreas de telhado de médio porte (tais como armazéns, shoppings, prédios, condomínios, entre outros) possam ser utilizadas para captação da água de chuva. Associada a esse fato, a inserção das membranas de UF em modo submerso diretamente no reservatório de água de chuva coletada permite uma fácil instalação das mesmas, sendo um promissor método para a potabilização de água de chuva. Além disso, os desenvolvimentos das tecnologias de produção de membranas durante as últimas décadas resultaram em uma diminuição significativa dos custos da membrana e as necessidades energéticas (CHURCHHOUSE, 2000), tornando-o um método competitivo de tratamento de águas.

Arnal *et al.* (2001) demonstram que estudos feitos com planta de ultrafiltração de pequeno porte permitem fornecer água para o consumo direto de até 300 pessoas. A planta opera manualmente (fechamento e abertura de válvulas e operação das retrolavagens) e não requer qualquer fonte de energia (pressurização por coluna d'água), podendo ser uma alternativa em situações de emergência.



Varbanets *et al.* (2009) mostraram que os processos de separação por membranas têm grande potencial para utilização em sistemas descentralizados para fornecimento de água. A UF foi tratada pelos autores como um método seguro para abastecimento de residências ou pequenos centros comerciais ou comunidades, mas que pode necessitar de energia elétrica ou mesmo de manutenções periódicas, o que dificulta uma maior aplicação social ou mesmo inserção em países pobres ou em desenvolvimento. Além disso, a água de chuva foi considerada uma fonte em potencial para abastecimento de sistemas descentralizados, embora o autor não apresente informações sobre a UF aplicada para tratamento de água de chuva.

## CONCLUSÃO

A água de chuva tratada por ultrafiltração apresentou qualidade que atende as prerrogativas da Portaria Brasileira e da Diretiva Europeia que abordam a qualidade de água para consumo humano. A UF com

membranas de 4 e 50 kDa apresentou bons fluxos permeados e ótimo desempenho em relação à qualidade da água produzida.

As membranas de UF de 4 e de 50 kDa removeram de forma satisfatória os parâmetros que tornam a água da chuva imprópria para consumo humano. Mesmo com diferentes características de material, tamanho de poro e configuração, as duas membranas testadas demonstraram resultados semelhantes quanto à qualidade da água produzida, atingindo padrões de potabilidade. Quanto ao fluxo permeado, a membrana de 50 kDa apresentou maior fluxo de permeado, e, em consequência, teria maior capacidade de produção, podendo ser utilizada para a potabilização de água de chuva.

Os resultados apresentados mostram o potencial da UF para o uso da água de chuva para abastecimento, uma vez que a prática atual de captação de águas e descarte de efluentes não mais atende as necessidades de uma sociedade sustentável. A água de chuva representa uma fonte de fácil captação e de razoável qualidade, e que apenas o processo de UF seria suficiente para torná-la potável.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1989) *NBR 10739*. Águas, determinação de oxigênio consumido - método do permanganato de potássio. Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. (2012) *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil* - Informe 2012. Brasília: ANA.
- ALBINET, A.; MINERO C.; VIONE, D. (2010) Photochemical generation of reactive species upon irradiation of rainwater: Negligible photoactivity of dissolved organic matter. *Science of the Total Environment*, v. 408, n.16, p. 3367-3373.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. (2000) *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 19th Edition.
- ARNAL, J.M.A.; FERNANDEZ, M.S.; VERDU, G.M.; GARCIA, J.L. (2001) Design of a membrane facility for water potabilization and its application to Third World countries. *Desalination*, v. 137, p. 63-69.
- BRASIL. (1997) Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da União*, Brasília, 8 jan. p. 3, 1997.
- BRASIL. (2011) Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, p. 39, 12 dez. 2011.
- BRIÃO, V.B. & TAVARES, C.R.G. (2012) Nota Científica: Ultrafiltração de água de enxágue modelo da indústria de laticínios para a recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 15, n. 4, p. 352-362.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION - CEU. (1998) COUNCIL DIRECTIVE (98/83/EC) of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*, 5 dez. 98.
- CHURCHHOUSE, S. (2000). Membrane bioreactors hit the big time - from lab to full scale application. *In*: RAUTENBACH, R.; MELIN, T.; DOHMANN, M. (Eds.), *Membrantechnik*, 3. Aachener Tagung, B12. Klenkes Druck und Verlag GmbH, Aachen, p. 11-17.
- DREWES, J.E.; REINHARD, M.; FOX, P. (2003) Comparing microfiltration-reverse osmosis and soil-aquifer treatment for indirect potable reuse of water. *Water Research*, v. 37, p. 3612-3621.
- FRENDRICH, R. & OLIYNIK, R. (2002) *Manual de utilização de águas pluviais*: 100 maneiras práticas. Curitiba: Livraria do Chain. 190 p.
- FORNARO, A. & GUTZ, I.G.R. (2003) Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil: Part 2 - contribution of formic and acetic acids. *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 1, p. 117-128.
- FORNARO, A. & GUTZ, I.G.R. (2006) Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil: Part 3. Trends in precipitation chemistry during 1983 - 2003 period. *Atmospheric Environment*, v. 40, p. 5893-5901.

GUEDES, T.L. (2012) *Tratamento de água de chuva através de microfiltração tangencial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

HABERT, A.C.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R. (2006) *Processos de Separação por Membranas. Escola Piloto em Engenharia Química - COPPE/UFRJ*. E-papers Serviços Editoriais. p180.

HELMREICH, B. & HORN, H. (2009) Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, v. 245, p. 118-124.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2010) *Atlas do Censo Demográfico*.

KIM, R.H; LEE, S.; KIM, J.O. (2005) Application of a metal membrane for rainwater utilization: Filtration characteristics and membrane fouling. *Desalination*, v. 177, p. 121-132.

KIM, R.H.; LEE, S.; JEONG, J.; LEE, J.H.; KIM, Y. K. (2007) Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, v. 202, p. 326-332.

LI, A.; ZHAO, X.; LUI, H.; QU J. (2011) Characteristic transformation of humic acid during photoelectrocatalysis process and its subsequent disinfection byproduct formation potential. *Water Research*, v. 45, p. 6131-6140.

MOREIRA NETO, R.F.; CALIJURI, M.L.; CARVALHO, I.C.; SANTIAGO, A.F. (2012) Rainwater treatment in airports usings lows and filtration followed by chlorination: Efficiency and costs. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 65, p. 124-129.

TEIXEIRA, M.M.C.G.R. (2001) *Ultrafiltração no tratamento de águas para consumo humano*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

VARBANETS, P.M.; ZURBRU, C.; SWARTZ, C.; PRONK, W. (2009) Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. *Water Research*, v. 43, p. 245-265.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. (2011) *Guidelines for drinking-water quality* - 4th ed. WHO. Disponível em: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf). Acesso em: 1 ago. 2016.