

II-924 - NITRIFICAÇÃO EM REATOR DO TIPO MBBR: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira⁽¹⁾

Professora Titular do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

Beatriz Melo Marques⁽²⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Alagoas.

Marcio Gomes Barboza⁽³⁾

Professor Titular do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

Daniele Vital Vich⁽⁴⁾

Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professora Adjunta do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

Elder de Oliveira Santana⁽⁵⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

Endereço⁽¹⁾: Av. Lourival de Melo Mota, s/n, Centro de Tecnologia – Tabuleiro do Martins – Maceió - Alagoas - CEP: 57072-970 – Brasil - Tel: +55 (82) 3214-1275 - e-mail: ilopes@ctec.ufal.br

RESUMO

A necessidade de remoção de nutrientes de efluentes, em particular o nitrogênio, é uma questão relevante, pois esse nutriente, quando em excesso, é responsável pela eutrofização dos corpos hídricos. O reator MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) surgiu da necessidade de tratamentos mais compactos, devido à crescente demanda nos grandes centros urbanos. A tecnologia MBBR utiliza mídias biológicas, permitindo o crescimento aderido de microrganismos, formando biofilmes. A formação dos biofilmes em camadas sucessivas cria um ambiente propício para a remoção de nitrogênio por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação. Este trabalho teve como objetivo realizar a revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre nitrificação em reatores MBBR, tratando efluentes domésticos, de forma a observar como as pesquisas têm abordado o tema ao longo do tempo. Para tanto, foram utilizados termos de busca na base de dados *Scopus*, tais como “*MBBR*”, “*Nitrification*” e “*Wastewater Treatment*”, com retorno de 232 trabalhos, após refinamento da pesquisa. A partir destes, foi realizada a análise bibliométrica. Os resultados indicaram a primeira publicação em 1993, e que há uma tendência ao crescimento de pesquisas sobre o tema até os dias atuais. Apesar da Noruega ter sido pioneira na pesquisa de reatores MBBR, a China é o país com o maior número de publicações e instituições que financiam as pesquisas. Ao longo do período de 1993 – 2023, Christensson, M. foi o autor que mais se destacou em número de publicações. Os principais eixos de pesquisa no horizonte temporal foram: adaptação dos sistemas convencionais de lodos ativados aos reatores MBBR, custos das mídias biológicas e buscas de materiais alternativos, desempenho dos reatores MBBR em baixas temperaturas, modelagem matemática do processo de nitrificação em reatores MBBR, estudo de biofilmes com vistas ao processo de nitrificação/desnitrificação simultâneas e diminuição de custos do processo com economia de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de efluentes; Reator MBBR; Mídias biológicas.

INTRODUÇÃO

O esgoto sanitário é constituído de aproximadamente 99,9% água e 0,1% de sólidos. Dessa parcela de sólidos, aproximadamente 70% são de origem orgânica, sendo composto em sua maioria por proteínas, carboidratos, e óleos e gorduras (VON SPERLING, 2005; METCALF; EDDY, 2016). Os compostos orgânicos são grandes poluidores dos corpos hídricos, por contribuírem para o consumo de oxigênio dissolvido, fornecerem macronutrientes, em especial o nitrogênio e o fósforo, que merecem atenção, pois possuem efeito fertilizante nas algas e outras plantas, acentuando a poluição (CHEN *et al.*, 2022).



A partir do século XX houve maior desenvolvimento do tratamento de esgoto, inicialmente com as estações fora da área urbana e hoje já dentro das grandes cidades (CHEN *et al.*, 2022). Até os anos 1970 o tratamento de efluentes estava associado à remoção de sólidos suspensos e flotáveis, ao tratamento de orgânicos biodegradáveis e à eliminação de organismos patogênicos, a partir da década de 80 a ênfase passou a ser os efeitos de longo prazo sobre a saúde da população e os impactos ao meio ambiente (METCALF; EDDY, 2016).

O crescimento das cidades fez surgir a necessidade de tratamentos mais compactos, enquanto a mudança no enfoque do tratamento fez com que tratamentos mais eficientes fossem almejados. A partir de tais mudanças, processos como filtros biológicos aerados, reatores de leito fluidificado, reatores de biofilme de leito móvel e outros foram desenvolvidos.

O reator biológico com leito móvel (MBBR - *Moving Bed Biofilm Reactor*) foi desenvolvido na Noruega no final da década de 1980 e início dos anos 90, com foco na remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. As vantagens em relação ao processo convencional de lodos ativados são: necessidade de menor área, ou seja, o tratamento é compacto, o resultado do tratamento depende muito menos da separação final do lodo, o que facilita a operação. Esta tecnologia é de grande sucesso em todo o mundo no tratamento de efluentes domésticos e industriais.

Diante o exposto, este trabalho teve como objetivo realizar a revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre nitrificação em reatores MBBR, tratando efluentes domésticos, de forma a observar como as pesquisas têm abordado o tema ao longo do tempo, os avanços obtidos e as principais tendências para pesquisas futuras.

METODOLOGIA

A análise bibliométrica foi realizada a partir da base de dados *Scopus*, de fácil acesso no portal Periódicos CAPES, por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), da qual a Universidade Federal de Alagoas é integrante.

O primeiro trabalho publicado sobre o tema foi em 1993. Assim, o horizonte da pesquisa compreendeu o período de 1993 até setembro/2023.

Foram realizadas duas pesquisas no dia 03 de setembro de 2023. A primeira foi feita utilizando as seguintes palavras-chave: *MBBR*, *Nitrification* e *Wastewater Treatment*, da qual retornaram 243 trabalhos. Estes termos deveriam constar no título, resumo ou palavras-chave da publicação. Entretanto, os resultados encontrados foram muito abrangentes e para melhor representar o objeto da pesquisa, foi feito um refinamento das palavras-chave, excluindo tratamento de lixiviados de aterros sanitários, efluentes salinos, de petróleo, corantes e outros efluentes, dessa forma retornaram 232 trabalhos, a partir dos quais foi realizada a análise bibliométrica.

As informações obtidas a partir da base de dados *Scopus* foram salvas em formato *comma-separated values* (CSV) e exportadas para os programas *Excel* e *VOSViewer*. No primeiro caso foram gerados gráficos e tabelas, já o segundo *software* foi utilizado com a finalidade de facilitar a visualização das redes de colaboração entre países, autores e palavras-chave.

Ao final, foi realizada uma avaliação do horizonte temporal, em décadas, para melhor conhecimento da tendência dos temas das publicações, com leitura e descrição de alguns trabalhos considerados relevantes, pelo critério de quantidade de citações e trabalhos nacionais.

A Figura 1 mostra um fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho.

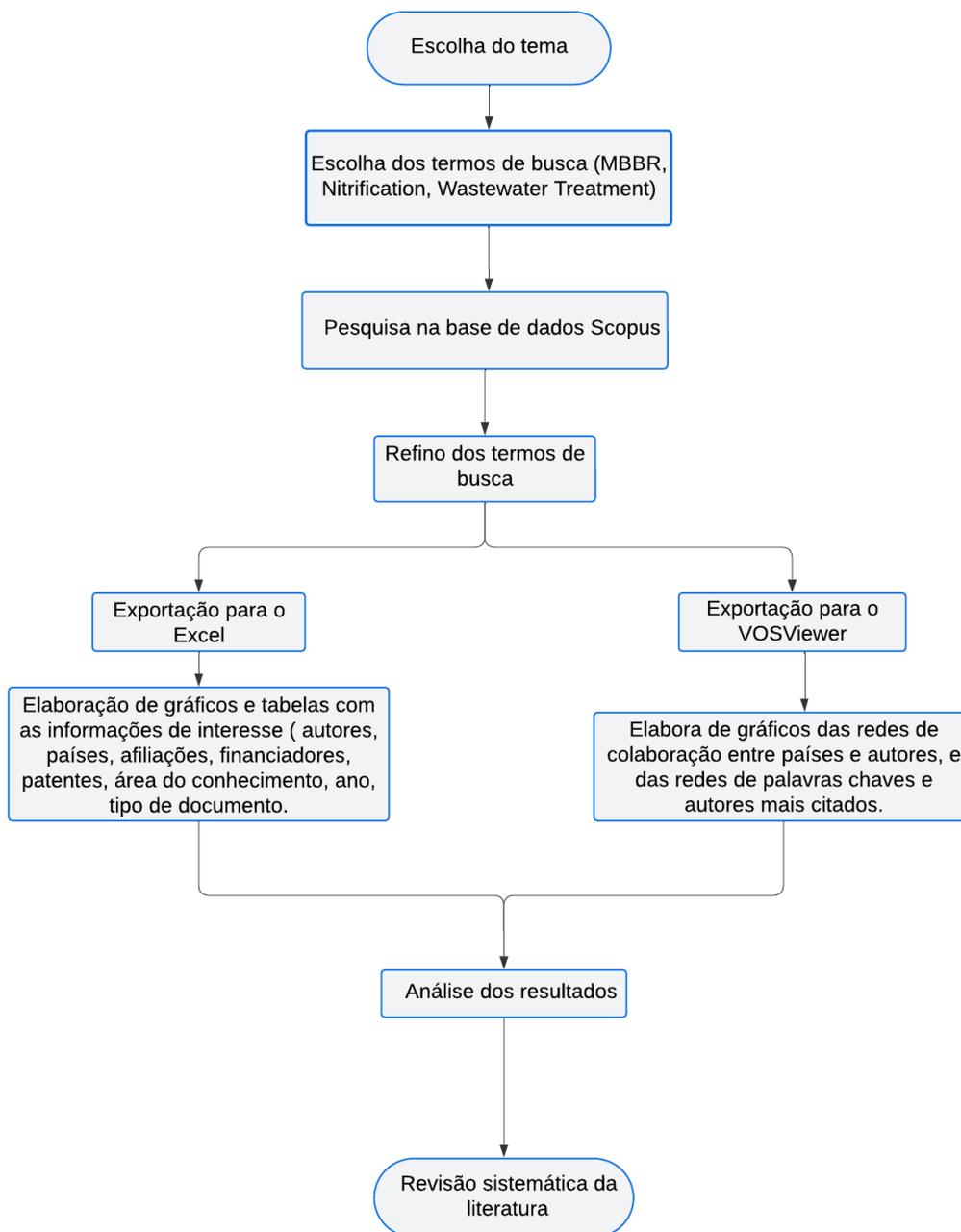


Figura 1: Fluxograma da metodologia

RESULTADOS E DISCUSSÕES

• Análise Bibliométrica

Como comentado, os estudos sobre reatores do tipo MBBR começaram no final da década de 1980 e início dos anos 1990, sendo o primeiro trabalho publicado em 1993. Assim, o horizonte desta pesquisa foi definido deste ano até setembro/2023. Conforme indicado na Figura 2, observa-se uma tendência de crescimento exponencial em relação às publicações acumuladas ao longo desses 30 anos.

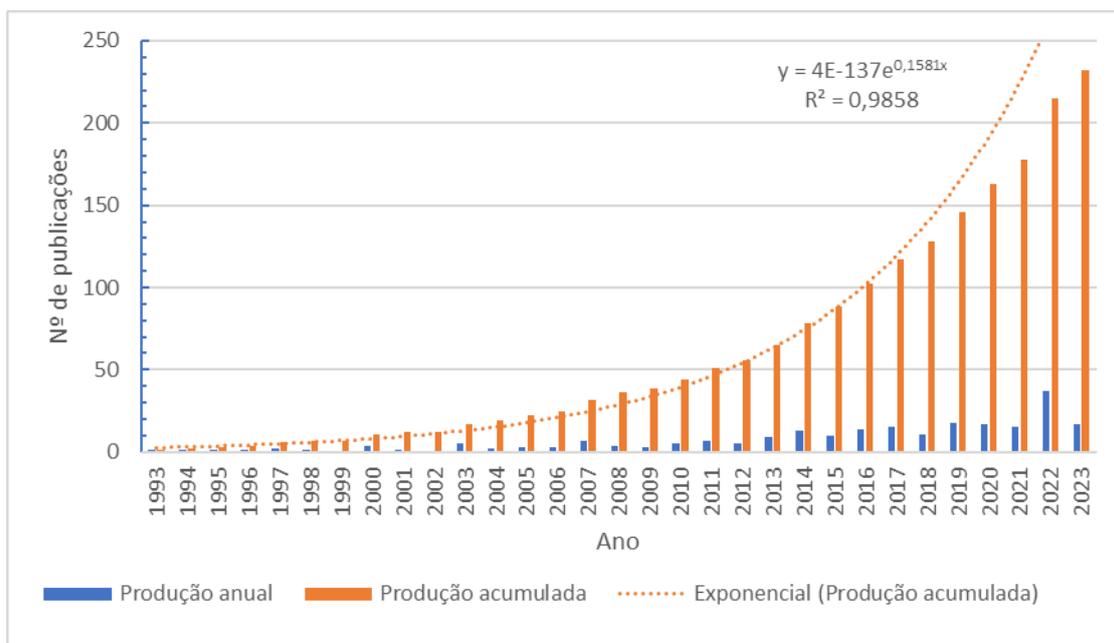


Figura 2: Número de publicações acumuladas por ano (1993-2023)

Analisando os tipos de publicações, os artigos aparecem em grande maioria (189) e representam 81,5% dos documentos, seguidos de artigos de conferência (28; 12,1%), revisões (8; 3,4%), capítulos de livros (6; 2,6%) e revisão de conferência (1; 0,4%).

Na Figura 3 observa-se a relação do número de publicações por autores, sendo o de maior destaque Christensson, M., com 11 publicações, da empresa *Veolia Water Technologies AB – AnoxKaldnes*, Lund, Suécia. Em seguida está o autor canadense Delatolla, R., do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Ottawa, com 8 publicações sobre o tema. Dois dos autores pioneiros na publicação de 1993, Ødegaard, H. e Rustin, B., do Instituto Norueguês de Tecnologia, Universidade de Trondheim, também figuram entre os dez autores que mais publicaram.

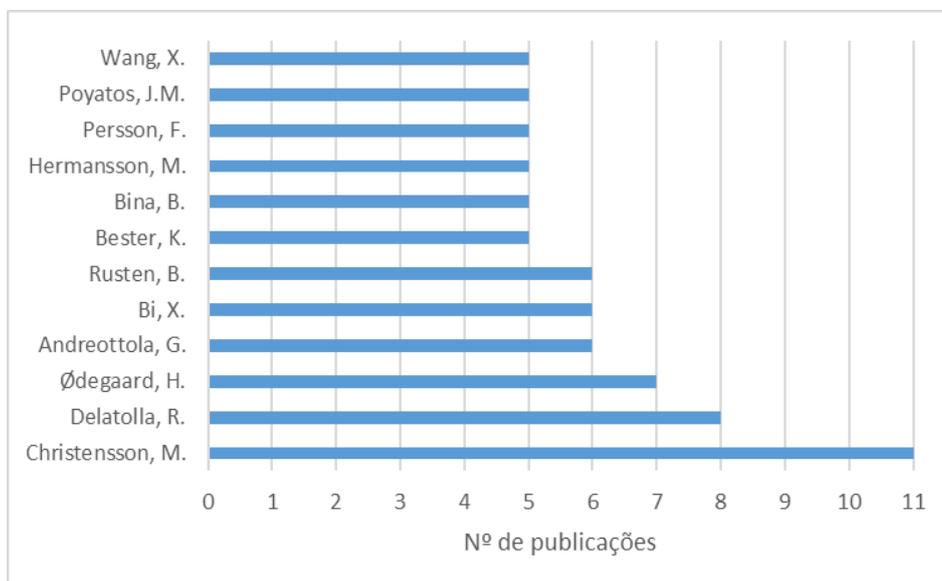


Figura 3: Número de publicações por autor (1993-2023)

Em relação à colaboração entre autores, foi utilizado um filtro de pelo menos 3 publicações em conjunto, com isso o *VOSviewer* retornou 15 autores que se destacaram em relação à colaboração. A rede de colaboração na qual o grupo de pesquisa formado por Di Capua *et al.* apresenta a maior quantidade de trabalhos em colaboração com outros grupos.

Dentre os autores mais citados, Ødegaard, H. aparece em destaque, uma vez que foi um dos pioneiros nos estudos sobre reatores do tipo MBBR, tendo 301 citações. Ødegaard, H. é seguido por Van Loosdrecht, M.C.M. e por Rusten, B., cada um com 241 e 217 citações, respectivamente.

Quanto ao número de publicações por países, a China se destaca com 30,2% dos trabalhos (70), bem acima do segundo colocado, Suécia, com 10,8% (25). O Brasil ocupa a 13ª posição no *ranking*, juntamente com Estônia, Iraque, Catar, Singapura e Turquia, com apenas três trabalhos que corresponde a 1,3% das publicações.

Dentre os trabalhos desenvolvidos no Brasil, está o de Araujo Junior, M.M.D., Lermontov, A., Araujo, P.L.S. e Zaiat, M., publicado em 2013 sob o título *Reduction of sludge generation by the addition of support material in a cyclic activated sludge system for municipal wastewater treatment*. Os pesquisadores são da Bio Proj. Tecnologia Ambiental e da Universidade de São Paulo, São Carlos.

As parcerias entre grupos internacionais podem ser observadas na rede de colaboração de países na Figura 4. Dos 48 países que tiveram publicações associadas ao tema em questão, destacam-se os 15 países que possuem pelo menos 5 publicações colaborativas. Os Estados Unidos possuem publicações em parceria com o Japão, Dinamarca, Índia e Suécia, representados pela cor verde (*cluster 1*). Enquanto a China, país com maior número de publicações, fez parceria com 16 países podendo-se destacar Noruega, Itália, França, Espanha e Austrália (*cluster 2*, representado pela cor vermelha). Já o Canadá, a Alemanha, a Bélgica e o Irã compõem um outro grupo de colaboração (*cluster 3*, em azul).

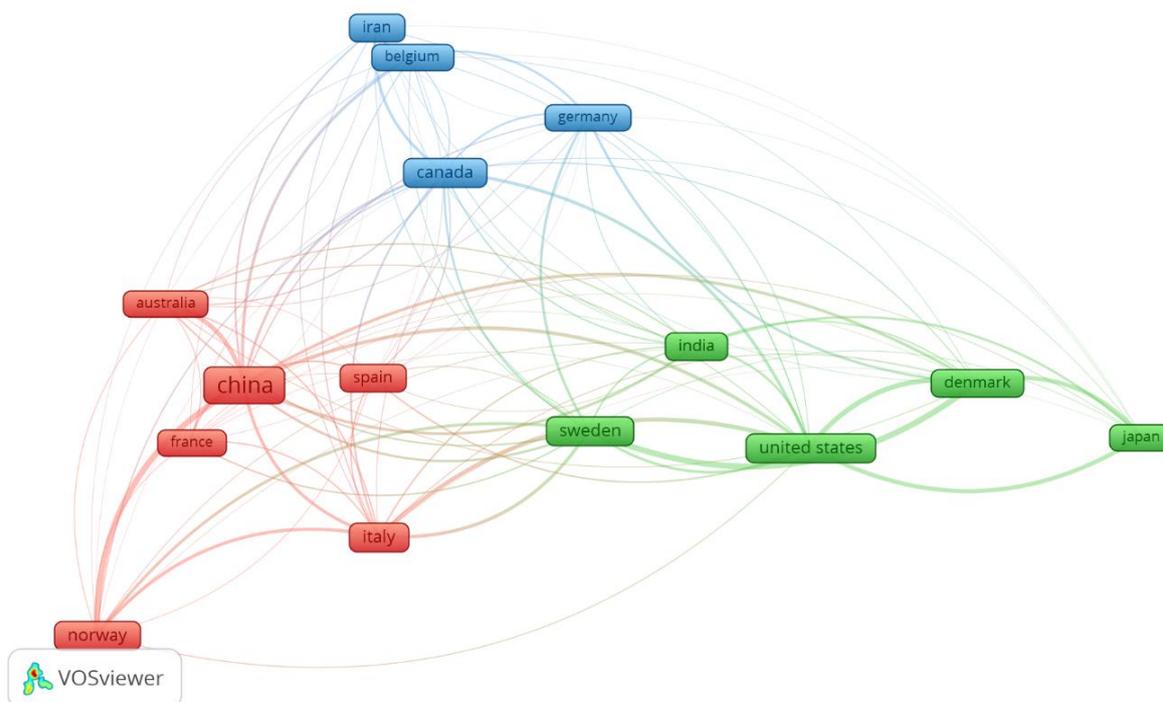


Figura 4: Principais redes de colaboração entre países
Fonte: VOSviewer, 2023

Nos 232 artigos exportados da base de dados *Scopus* as 30 palavras-chave que apareceram em pelo menos 5 documentos indicaram que o interesse pelo processo de remoção do nitrogênio e fósforo aumentou à medida que os estudos sobre a viabilidade do biorreator MBBR avançaram (Figura 5).

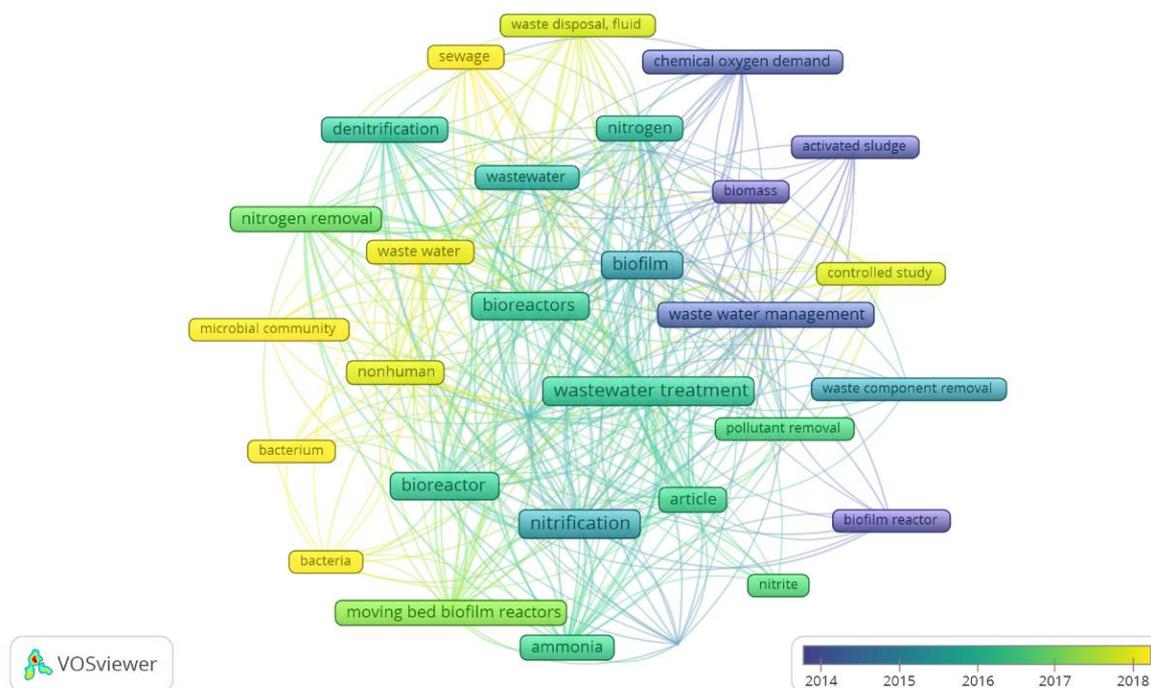


Figura 5: Rede de palavras-chave

Fonte: VOSviewer, 2023

Dos trabalhos relacionados neste levantamento bibliométrico foram registradas 63 patentes, o que demonstra ser uma área com grandes possibilidades de inovação tecnológica. O destaque neste quesito é o Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos com 45 registros de patentes, ou seja 71,4%.

• Eixos temáticos no horizonte temporal (1993-2023)

Nesta seção, os principais eixos temáticos explorados em cada década do período (1993 a 2023) foram comentados. Ressalta-se que das 232 publicações, apenas 40 foram de acesso aberto. As demais só foi possível o acesso aos resumos.

1993-1999

O primeiro trabalho indexado à base de dados *Scopus* foi de 1993, em que os autores apresentaram experiências de uma estação de tratamento de efluentes de pequeno porte (4 m³/h), com reator MBBR, e seguindo as recomendações das autoridades de controle da poluição da Noruega (ØDEGAARD *et al.*, 1993). As eficiências de remoção de carga orgânica e fósforo foram muito acima das exigidas pelos órgãos de controle ambiental daquele país, entretanto, a remoção de nitrogênio foi limitada pela baixa quantidade de biomassa disponível para desnitrificação. Os autores destacam que para aumentar a remoção de nitrogênio deve-se reduzir o bombeamento de efluente e a quantidade de material suporte no reator anóxico deve ser aumentada (ØDEGAARD *et al.*, 1993).



Nessa década o foco das pesquisas com reatores foi a remoção de carga orgânica e nitrogênio, nos efluentes domésticos, com a nova tecnologia. A adaptação dos sistemas convencionais de lodos ativados aos reatores MBBR também era foco das pesquisas.

Em 1994, Rusten e colaboradores demonstraram que ETEs fundamentadas em lodos ativados podem ser facilmente adaptadas à nova tecnologia, ou seja, reatores MBBR. Os resultados obtidos em uma ETE em escala real indicaram remoções de 80-90% de nitrogênio (RUSTEN *et al.*, 1994).

Entretanto, com 80 citações, o trabalho de Rusten; Lars; Ødegaard (1995) intitulado *Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using Moving-Bed Biofilm Reactors* já demonstrava a preocupação com a performance dos reatores MBBR em climas frios (RUSTEN *et al.*, 1995), que foi explorada nas décadas seguintes.

2000-2009

Nos anos 2000 houve um aumento considerável de publicações em relação à década anterior, totalizando 20 trabalhos. Também é nessa década que surgem os primeiros grupos de pesquisas da China, na base de dados Scopus, incluindo Wang, X. *et al.* (2006) e Zhang, Y-B, *et al.* (2008).

Em 2004, a preocupação com os custos das mídias biológicas já era evidente. Assim, Orantes e González-Martínez (2004) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de avaliar meio suporte alternativo e de baixo custo em reator MBBR tratando esgoto doméstico em escala piloto. O material suporte do biofilme foi confeccionado de tubo de polietileno com diâmetro interno de 1,1 cm, cortado em pedaços de 1,2 cm, cuja área superficial específica foi de 590 m²/m³, compatível com as mídias biológicas comerciais. Os resultados indicaram um bom desempenho do reator MBBR, com remoção total máxima de DQO de 81%. A nitrificação foi observada apenas para cargas orgânicas com valores inferiores a 5,7 g DQO/m².d. O meio suporte demonstrou boa aderência do biofilme para as diferentes cargas orgânicas aplicadas. Após meses de operação o material suporte experimental não demonstrou sinais de desgaste. A quantidade de microrganismos aderida aumentou com a carga orgânica, com valor máximo de 17,3 g/m², medida como sólidos secos.

Dentre os trabalhos de maior relevância, está o de Rusten *et al.*, (2006), sendo o mais citado, com 307 ocorrências. Os autores investigaram parâmetros de projeto e operação de reatores MBBR com uso de meios suporte Kaldnes (K1).

Outro trabalho de destaque na área, com 296 citações na base de dados Scopus, foi o de Ødegaard (2006), intitulado *Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process*. O autor demonstrou que o MBBR pode ser usado em um processo extremamente compacto de alta taxa, com tempo de detenção hidráulica menor que 1h, para tratamento secundário de efluentes domésticos. Várias ETEs foram monitoradas neste estudo, e em três plantas norueguesas foram verificadas elevadas taxas de nitrificação (1,2 gN-NH₄/m².d) e de desnitrificação (3,5 g N-NO₃/m².d) mesmo em baixas temperaturas (11°C) (ØDEGAARD, 2006).

Outros autores também demonstraram interesse no funcionamento de reatores MBBR, durante a nitrificação em baixas temperaturas.

Salveti *et al.* (2006) publicaram o artigo intitulado *Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors*. O efeito da temperatura das águas residuais na taxa de nitrificação foi estudado em dois reatores de biofilme de leito móvel, com uso de oxigênio puro, alimentados com efluente secundário de uma ETE tratando esgoto doméstico. O primeiro Reator (R1) foi operado sob condições limitantes de amônia, enquanto o segundo Reator (R2) foi operado sob condições limitantes de oxigênio. O R1 demonstrou pouca mudança nas taxas de nitrificação em função da temperatura, enquanto o R2 mostrou uma dependência muito maior. Os autores concluíram que, sob condições limitantes de oxigênio, a atividade específica da biomassa (a relação entre a taxa de nitrificação e a concentração de biomassa) foi fortemente influenciada pelos efeitos combinados da penetração do oxigênio através do biofilme e da temperatura do efluente.

Esta década também se destacou pelas pesquisas sobre modelagem matemática do processo de nitrificação em reatores MBBR, como os trabalhos relacionados na Tabela 1.

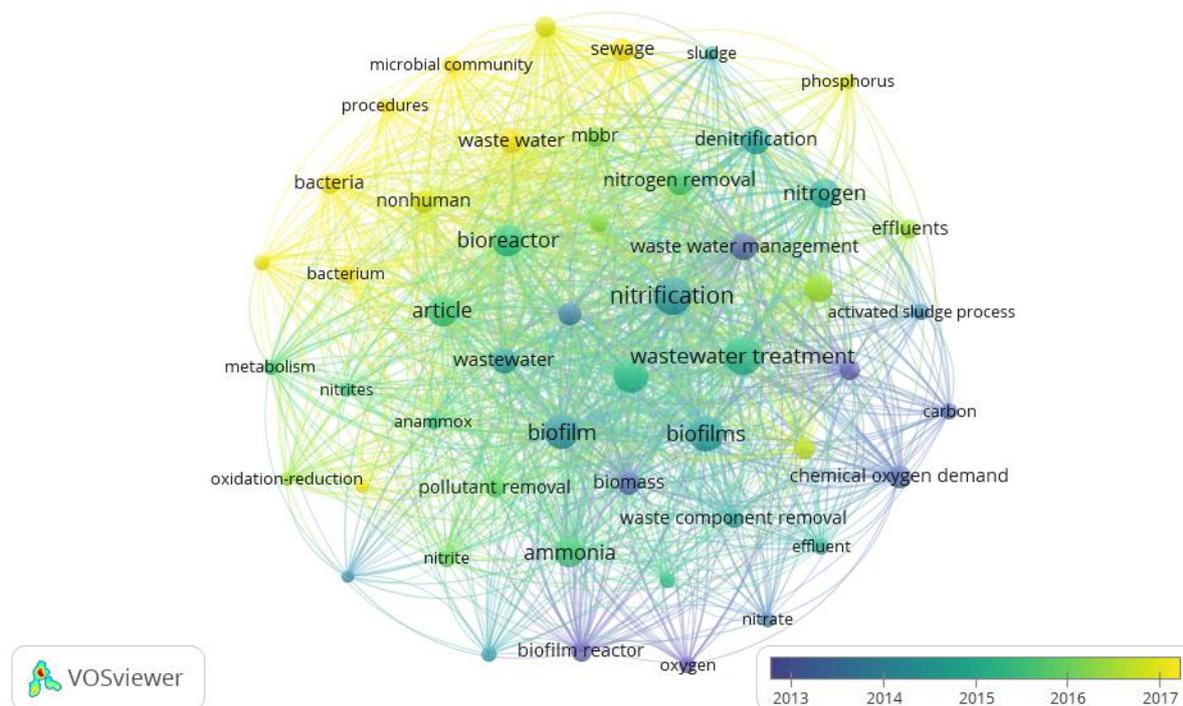
Tabela 1: Trabalhos sobre modelagem matemática (2000 – 2009).

Título	Referência
<i>Modeling, identification, and validation of models for predictive ammonia control in a wastewater treatment plant - A case study</i>	Stare <i>et al.</i> (2006)
<i>Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater</i>	Plattes <i>et al.</i> (2006)
<i>Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process</i>	Larrea <i>et al.</i> (2007)
<i>Modelling nitrification of a lagoon effluent in moving-bed biofilm reactors</i>	Houwelig <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Autores, 2023.

2010-2019

De 2010 a 2019 a quantidade de publicações mais que quadruplicou em relação à década passada chegando ao total de 86 documentos publicados na base de dados *Scopus*. Na Figura 6 são indicadas as 50 palavras-chave mais utilizadas nas publicações dessa década, de onde pode ser inferido que os interesses variaram desde a demanda de oxigênio, passando pela nitrificação (maior interesse em 2014-2015), e no final da década as mais utilizadas estão relacionadas à comunidade microbiana dos biorreatores.

**Figura 6: Palavras-chave mais utilizadas na década de 2010-2019**

Fonte: VOSviewer, 2023

A investigação do desempenho de diferentes mídias biológicas também esteve presente nessa década, a exemplo do trabalho de Chu e Wang (2011), sendo o segundo mais citado com 143 ocorrências. Sob o título *Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio*, o trabalho avaliou dois reatores com diferentes meios suportes, com vistas à remoção de matéria orgânica e nitrogênio.

No primeiro, o meio suporte era composto por partículas de polímero biodegradável policaprolactona (PCL), e no segundo espuma de poliuretano inerte (PU). Os reatores, em escala de laboratório, foram alimentados com esgoto sintético com 10 mg de NO_3/L e inoculados com lodo de uma ETE municipal. Os autores concluíram que o MBBR preenchido com meio suporte de PU apresentou bom desempenho na remoção de COT e amônia, pois numerosos microorganismos ficaram aderidos aos poros do material, o que aumenta os nitrificantes (CHU; WANG 2011).

Para os efluentes com baixa relação C/N, o MBBR preenchido com meio suporte de PCL biodegradável, apresentou boa remoção de nitrogênio total. A fonte de carbono sólido (PCL) é degradado mais lentamente que o carbono solúvel, sendo um substrato eficaz para a desnitrificação. Entretanto, dois fatores foram considerados limitantes para uso de material polimérico biodegradável: (i) o alto custo, (ii) e a necessidade de desenvolvimento de transportadores mais porosos para aumentar a biomassa anexada (CHU; WANG 2011).

Novos materiais de meios suportes foram testados por Song *et al.* (2019), que investigaram um novo MBBR com esponjas de poliuretano à base de pó de zeólita como biocarreadores (Z-MBBR), na nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS), e compararam seu desempenho com um em que a mídia biológica era apenas a espuma de poliuretano (S-MBBR).

O reator Z-MBBR foi mais eficiente em relação ao S-MBBR na remoção de nitrogênio total e na NDS, pois foi detectado que a comunidade microbiana apresentou mais bactérias desnitrificantes no sistema Z-MBBR. Também foi constatada maior aderência do biofilme nas mídias biológicas do novo MBBR, ou seja, 1,3 vez maior que a dos meios suportes esponjosos (S-MBBR) (SONG *et al.*, 2019).

O artigo mais citado nessa década foi *Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance* de Mcquarrie e Boltz, publicado em 2011, com 189 citações. Os autores sintetizaram os estudos sobre o MBBR até aquele momento, comentando sobre aplicações do processo, *design* das mídias biológicas e desempenho do reator, além de identificar carência de estudo em algumas áreas como a hidrodinâmica do biorreator, mecanismos que quantificam a emissão de gases de efeito estufa gerados no processo de remoção total do nitrogênio, entre outros (MCQUARRIE; BOLTZ, 2011).

2020-2023

Essa década, ainda em curso, está sendo bastante produtiva. A seleção das 20 palavras-chave mais frequentes indica que a nitrificação e desnitrificação simultâneas aparece em trabalhos mais recentes. Um dos temas abordados é relativo aos biofilmes com vistas ao processo de nitrificação/desnitrificação simultâneas.

Tratando-se da nitrificação em biorreator MBBR o artigo *Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater*, de Liu *et al.* (2020), é o mais citado com 88 citações. Os autores utilizaram meios suportes convencionais e modificados com superfície feita de granulos de polietileno, poliquatérnio-10 e óxido férrico (Fe_2O_3), ambos com área superficial variando entre 560 e 600 m^2/m^3 .

Foram utilizados dois reatores em escala de laboratório, os meio suportes modificados foram usados no reator experimental (reator1) e os convencionais utilizados no reator de controle (reator 2), ambos reatores possuíam taxa de enchimento de 30%, temperatura entre 21°C e 23°C, disco de aeração e dispositivo agitador, e foram alimentados com águas residuárias de sistema de drenagem de uma área residencial (LIU, *et al.*, 2020). Ainda de acordo com os autores supracitados o reator 1 se mostrou mais eficiente na remoção de amônio com 98,2% em relação ao reator 2 que teve 79,3% (LIU *et al.*, 2020).

Outro trabalho com relevância, com 34 citações, foi *Simultaneous nitrification and denitrification in moving bed biofilm reactor and other biological systems* de Bhattacharya e Mazumder (2021). O estudo é uma revisão bibliográfica a respeito da nitrificação-desnitrificação simultânea em MBBR.

Os autores concluíram que o MBBR é um sistema promissor para a remoção do nitrogênio por meio do processo simultâneo de nitrificação e desnitrificação (NDS), sendo o OD e a espessura do biofilme fatores determinantes para o sucesso NDS, entretanto, destacam que a taxa de cisalhamento dos meios suportes

depende da velocidade do fluxo, das características da mídia biológica, dentre outros fatores (BHATTACHARYA; MAZUMDER, 2021).

O trabalho de revisão produzido por Di Capua *et al.* (2022), sob o título *Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications*, com colaboração entre Itália e Estados Unidos, faz uma revisão sobre a nitrificação e desnitrificação em estágio único, num mesmo reator, em sistemas MBBR e de lodos ativados granular, uma vez que os gradientes de oxigênio permitem o desenvolvimento de biofilmes multicamadas, incluindo bactérias nitrificantes e desnitrificantes.

As condições ambientais podem ter grande influência na performance da Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas (NDS), como o desenvolvimento de biofilme e as vias bioquímicas. Segundo os autores, avanços recentes delinearão a possibilidade de reduzir o consumo de carbono e energia do processo e, simultaneamente, remover nitrogênio e fósforo sob condições operacionais específicas, abrindo novas possibilidades para o tratamento de efluentes (DI CAPUA *et al.*, 2022).

Os autores realizaram uma revisão crítica dos fatores que influenciam a NDS e sua aplicação em sistemas de biofilme, tanto em escala de laboratório quanto em escala real. São fornecidas estratégias operacionais para melhorar a eficiência da NDS e para reduzir a emissão de óxido nitroso e os custos operacionais (DI CAPUA *et al.*, 2022).

TENDÊNCIAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Muitos avanços ocorreram desde a concepção do primeiro reator MBBR até o que se conhece hoje. Estudos sobre modificação de biocarreadores, técnicas de aeração, hibridização do MBBR com outros tratamentos biológicos e os processos físico-químicos apresentaram desempenho promissor na remoção de matéria orgânica e nutrientes (GUPTA *et al.*, 2022).

Embora o tratamento baseado em MBBR tenha demonstrado avanços na remoção eficaz de vários poluentes, algumas áreas podem ser exploradas, tais como:

- a avaliação do ciclo de vida (ACV), que pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz de tomada de decisão para a avaliação de aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, e assim, da sustentabilidade do processo de tratamento (GUPTA *et al.*, 2022);
- a aplicabilidade dos sistemas modificados e híbridos como uma solução sustentável numa perspectiva global; e
- o desenvolvimento e a aplicação de mídias biológicas modificadas mais sustentáveis e ecológicas (SHITU, *et al.*, 2022).

CONCLUSÕES

A revisão bibliométrica possibilitou a análise dessa área de estudo a partir de uma perspectiva cronológica, fundamentada nas informações da base de dados *Scopus*. Conclui-se que desde a primeira publicação (1993), houve um crescimento não linear em termos de trabalhos publicados. O ano de 2022 é o que possui maior número de publicações (37). A maior parte dos trabalhos são artigos (189) e se enquadram na área das ciências ambientais (194).

A China é o país que mais investe em publicações, com 70 publicações (30,2% do total), além de possuir o maior número de colaborações internacionais (16 publicações colaborativas). Ademais, os números de financiadores de pesquisas sobre o tema apontam que o país asiático lidera com 24 pesquisas financiadas pela Fundação Nacional de Ciências Naturais da China e 12 publicações de afiliações do Ministério da Educação.

Apesar do protagonismo chinês, o autor com maior número de publicações é Christensson, M., da Suécia, com



11 publicações. Em relação à colaboração entre autores o grupo de pesquisa *Di Capua* e colaboradores, formado por italianos e americanos, lidera. Os números de registros de patentes mostram que a China não aparece entre os cinco principais nomes, o domínio dos registros é de um escritório dos Estados Unidos.

Com base nas palavras-chave geradas pelo *VOSViewer* conclui-se que houve um aumento no interesse dos estudos sobre comunidades microbiológicas, justificado pelo aumento do interesse no processo de remoção de nutrientes.

Os eixos temáticos por década mostram que o foco das pesquisas foram mudando ao longo do tempo. Na década de 1990, os primeiros trabalhos tinham como objetivo estudar a eficiência da remoção da carga orgânica e nitrogênio nos efluentes domésticos, e adaptação dos sistemas de lodo ativado para reatores MBBR.

Na década seguinte (2000-2009), o efeito de parâmetros como temperatura, oxigênio dissolvido e DQO na nitrificação foram amplamente estudados. Além disso, começaram a surgir questionamentos sobre materiais alternativos a serem usados como meios suportes, uma vez que o preço das mídias biológicas comerciais é elevado.

Os estudos sobre meios suportes alternativos tiveram novos desdobramentos a partir de 2010. Nessa década, modelos matemáticos do processo de nitrificação em MBBRs passam a ser estudados.

Na década atual a busca por diminuição dos custos dos sistemas MBBR continua, agora com foco na economia de energia. Também passou a ser estudado o processo simultâneo de nitrificação/desnitrificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO JUNIOR, M. M. D.; LERMONTOV, A.; ARAUJO, P. L. D. S., ZAIAT, M. Reduction of sludge generation by the addition of support material in a cyclic activated sludge system for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, v. 143, p. 483-489, set. 2013.
2. BHATTACHARYA, R.; MAZUMDER, D. Simultaneous nitrification and denitrification in moving bed bioreactor and other biological systems. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 44, n. 4, p. 635-652, 2 jan. 2021.
3. CHEN, G.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; EKAMA, G.A.; BRDJANOVIC, D. Desenvolvimento do Tratamento de Esgoto. Cap. 1. Tradução: Marcelo Kenji Miki. *Tratamento Biológico de Esgoto: Princípios, Modelagem e Projeto*, 2ª edição. Editor da versão em português: Marcelo Kenji Miki. IWA Publishing. 2022. 973p.
4. CHU, L.; WANG, J. Comparison of polyurethane foam and biodegradable Polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio. *Chemosphere*, v. 83, n. 1, p. 63-68, mar. 2011.
5. DICAPUA, F.; IANACONE, F.; SABBA, F.; ESPOSITO, G. Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. *Bioresource Technology*. v.361. Oct. 2022.
6. GUPTA, B.; GUPTA, A. K.; GHOSAL, P. S.; LAL, S.; SAIDULU, D.; SRIVASTAVA, A.; UPADHYAY, M. Recent advances in application of moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: Insights into critical operational parameters, modifications, field-scale performance, and sustainable aspects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.10, n.3, 2022.
7. HOUWELING, D.; MONETTE, F.; MILLETTE, L.; COMEAU, Y. Modelling Nitrification of a Lagoon Effluent in Moving-Bed Biofilm Reactors. *Water Quality Research Journal*, v.42, n.4, p.284-294. 2007.
8. LARREA, L.; ALBIZURI, J.; ABAD, A.; LARREA, A.; ZALAKAIN, G. Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process. *Water Science & Technology*, v.55, n. 8-9, p. 317-327. 2007.
9. LIU, T.; HE, X.; JIA, G.; XU, J.; QUAN, X.; YOU, S. Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater. *Chemosphere*, v. 247, 125831, maio 2020.
10. McQUARRIE, J. P.; BOLTZ, J. P. Moving Bed Biofilm Reactor Technology: process applications, design, and performance. *Water Environment Research*, v. 83, n. 6, p. 560-575, jun. 2011. Wiley.



11. METCALF & EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2016. 1980 p. Tradução: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa.
12. ØDEGAARD, H.; RUSTEN, B.; BADIN, H. Small Wastewater Treatment Plants Based on Moving Bed Biofilm Reactors. *Water Science & Technology*, v.28, n.10, p. 351-359, 1 nov. 1993. IWA Publishing.
13. ØDEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. *Water Science And Technology*, v. 53, n. 9, p. 17-33, 1 abr. 2006. IWA Publishing.
14. ORANTES, J.C.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S. A new low-cost biofilm carrier for the treatment of municipal wastewater in a moving bed reactor. *Water Science & Technology*, v. 48, n. 11-12, p. 243-250, 1 dez. 2004. IWA Publishing.
15. PLATTES, M.; HENRY, E.; SCHOSSELER, P.M.; WEIDENHAUPT, A. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, v. 32, n. 2, p. 61-68, nov. 2006.
16. RUSTEN, B.; SILJUDALEN, J. G.; NORDEIDET, B. Upgrading to nitrogen removal with the KMT moving bed biofilm process. *Water Science & Technology*, v. 29, n. 12, p. 185-195, 1 dez. 1994. IWA Publishing.
17. RUSTEN, B.; HEM, L. J.; ØDEGAARD, H. Nitrogen Removal from Dilute Wastewater in Cold Climate Using Moving-Bed Biofilm Reactors. *Water Environment Research*, v. 67, n. 1, p. 65–74. 1995.
18. RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULGENES, Y.; LYGREN, E. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, v.34, n.3, p. 322-331, maio 2006.
19. SALVETTI, R.; AZZELLINO, A.; CANZIANI, R.; BONOMO, L. Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors. *Water Research*, v.40, n.15, p. 2981-2993, ago. 2006.
20. SHITU, A.; GANG LIU, G.; MUHAMMAD, A. I.; ZHANG, Y.; TADDA, M.A.; QI, W.; LIU, D.; YE, Z.; ZHU, S. Recent advances in application of moving bed bioreactors for wastewater treatment from recirculating aquaculture systems: A review, *Aquaculture and Fisheries*, v.7, n.3, p.244-258, 2022.
21. SONG, Z.; ZHANG, X.; NGO, H. H.; GUO, W.; SONG, P.; ZHANG, Y.; WEN, H.; GUO, J. Zeolite powder based polyurethane sponges as biocarriers in moving bed biofilm reactor for improving nitrogen removal of municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, v. 651, p. 1078-1086, fev. 2019.
22. STARE, A.; HVALA, M.; VRECKO, D. Modeling, Identification, and Validation of Models for Predictive Ammonia Control in a Wastewater Treatment Plant—A Case Study. *ISA Transactions*. v.42, n.2, p.159-174, 2006.
23. VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. 3ª edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. 452p.
24. WANG X.J.; XIA, S.Q., CHEN, L.; ZHAO, J.F.; RENAULT, N.J., CHOVELON J.M. Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor, *Process Biochemistry*, v.41, n.4, p. 824-828. 2006.
25. ZHANG, Y-B.; WU, G-H.; XING, Y-B.; QUAN, X.; ZHAO, Y-Z.; QUAN, W-Z. Effect of COD concentration on phosphorus and nitrogen removal in SBMBBR. *Journal of Dalian University of Technology*, v. 48, n. 3, p. 329-333. 2008.