

## 25º. Encontro Técnico AESABESP

### PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA À REMOÇÃO DE NUTRIENTES DO ESGOTO SANITÁRIO

#### **Allan Saddi Arnesen<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Engenheiro da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

#### **Rosane Ebert Miki**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Santa Maria. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos. Engenheira da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Costa Carvalho, 300, Prédio da Prefeitura – piso superior – Pinheiros – São Paulo – SP - CEP: 05429-900 - País - Tel: +55 (11) 3388-9541 - Fax: +55 (11) 3388-8695 - e-mail: [aarnesen@sabesp.com.br](mailto:aarnesen@sabesp.com.br).

#### **RESUMO**

A ocorrência de nutrientes em grandes quantidades nos corpos d'água provocados pelo lançamento de esgoto sanitário causa problemas ambientais como a eutrofização e a mortandade de peixes. A maioria das ETEs do Brasil é de nível secundário, ou seja, não proporcionam a remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto. A tendência é que, após a universalização do serviço de tratamento de esgoto, as companhias brasileiras busquem readequações em suas ETEs para que elas removam nitrogênio e fósforo, minimizando a poluição dos corpos receptores. Assim, o mapeamento das tecnologias disponíveis para remoção de nutrientes é importante para guiar as empresas nesta melhoria necessária nas estações. A prospecção tecnológica é uma alternativa para identificar as tendências de estudos técnico-científicos sobre remoção de nutrientes do esgoto sanitário. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação de uma ferramenta de prospecção tecnológica para identificar as principais tecnologias de remoção de nutrientes do esgoto sanitário.

**PALAVRAS-CHAVE:** prospecção tecnológica, remoção de nutrientes e esgoto sanitário.

## INTRODUÇÃO

O aumento do teor de nutrientes nos corpos d'água, provocado principalmente pelo lançamento de esgoto sanitário, causa a problemas ambientais como degradação estética e recreacional, condições de anaerobiose, mortalidade de peixes, toxicidade liberada pelas algas e maior dificuldade no tratamento das águas de abastecimento. Portanto, o tratamento de esgoto sanitário não é apenas importante para a remoção de carga orgânica, mas também para a remoção destes nutrientes que podem impactar os corpos receptores.

A forma tradicional de remoção de nitrogênio do esgoto em estações de tratamento de esgoto (ETEs) ocorre através da nitrificação, conversão de amônia a nitrito e deste a nitrato (em condições aeróbias), seguida da desnitrificação, conversão de nitrato a nitrogênio gasoso em condições (sem a presença de oxigênio) (equações 1 a 4). Em geral, para promover a remoção biológica de nitrogênio nas ETEs, a nitrificação e desnitrificação ocorrem em etapas separadas e sequenciais de tratamento.

Nitritação (oxidação de amônia a nitrito):  $2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O + Energia$   
Equação (1)

Nitratação (oxidação de nitrito a nitrato):  $2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- + Energia$   
Equação (2)

Nitrificação (reação global):  $NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O + Energia$   
Equação (3)

Desnitrificação (redução do nitrato a nitrogênio gasoso):  $2NO_3^- + 2H^+ \rightarrow N_2 + 2,5O_2 + H_2O$   
Equação (4)

A remoção de nutrientes no tratamento de esgoto ocorre em nível terciário de tratamento, sendo que poucas estações de tratamento do Brasil possuem essa capacidade. Após a universalização do serviço de tratamento de esgoto, a tendência futura, portanto, será de readequação das estações existentes para que a remoção de nutrientes seja contemplada. Assim, são de grande interesse para a comunidade do saneamento os estudos voltados à readequação e otimização de estações existentes, principalmente no processo de lodos ativados, para que o objetivo de remoção de nutrientes seja atendido.

Recentemente, novos métodos de remoção de nitrogênio do esgoto podem ser aplicados para promover a remoção de nitrogênio em ETEs existentes, como a nitrificação/desnitrificação simultânea (SND - *Simultaneous Nitrification and Denitrification*), por exemplo. Na SND o oxigênio é utilizado para a nitrificação e o nitrato e/ou nitrito utilizados para desnitrificação no mesmo reator, através do controle de baixas concentrações de oxigênio dissolvido no tanque de aeração, propiciando inclusive economia de energia na estação.

Além do SND, novas vias alternativas têm sido estudadas à remoção de nitrogênio pela comunidade científica, tais como oxidação anaeróbica de amônia (ANAMMOX), Nitrificação parcial, SHARON (*Single Reactor systems for High Ammonium Removal Over Nitrite*), OLAND (*Oxygen Limited Autotrophic Nitrification-Denitrification*) e CANON (*Completely Autotrophic Nitrogen Removal Over Nitrite*).

Já a remoção de fósforo dos esgotos é mais recente e realizada predominantemente por processos físico-químicos, através da precipitação química do fósforo. Contudo, os processos biológicos emergentes de remoção de fosforo tem ganhado ênfase já que oferecem uma oportunidade de recuperação do fósforo de forma mais facilitada do que os precipitados químicos (DE-BASHAN & BASHAN, 2004).

Uma alternativa para mapear todas as novas tendências de remoção de nutrientes é a prospecção tecnológica. De acordo com Salles-Filho & Zackiewicz (2001), a prospecção tecnológica reúne um conjunto de atividades de busca e interpretação de informações

quantitativas e qualitativas, objetivas e subjetivas, com o objetivo de planejar as ações futuras de P&D. Para isso, empregam-se técnicas e métodos que procuram ampliar a precisão e a confiabilidade da busca, de modo a garantir um eficaz apoio à tomada de decisão.

Dentre a variedade de métodos de prospecção tecnológica conhecidos, optou-se pelo levantamento e análise da produção técnica e científica registrada em artigos publicados em periódicos acadêmicos de circulação internacional, que pode ser acessada através de buscas em banco de dados estruturados.

Assim, no presente trabalho foi desenvolvido um estudo de prospecção tecnológica com o objetivo de verificar as principais técnicas que têm sido aplicadas para a remoção de nutrientes do esgoto sanitário, utilizando como fonte de informação a produção técnica e científica publicada pela comunidade científica em artigos de periódicos e em eventos técnicos.

## **OBJETIVO**

O objetivo do trabalho é identificar as tecnologias mais estudadas no meio técnico-científico e aquelas em ascensão para o tema remoção de nutrientes com potencial de aplicação nas áreas operacionais das companhias de saneamento brasileiras.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A prospecção de informação tecnológica de artigos científicos foi efetuada na base de dados *ISI Web of Science*, plataforma de pesquisa desenvolvida pela empresa *Thomson Reuters*, que acessa bases de diversos periódicos e eventos realizados no mundo.

Nesta plataforma, podem ser utilizados filtros em uma pesquisa avançada, escolhendo palavras-chave, autores, periódicos, etc., de forma similar às pesquisas realizadas em diversos sites da internet. No entanto, optou-se por estabelecer uma expressão de busca contendo palavras-chave que devem ou não aparecer nos artigos científicos pesquisados.

É importante destacar que o processo de pesquisa é iterativo, ou seja, são realizadas repetidas combinações de palavras-chave de busca e avaliados os respectivos artigos resultantes até que seja obtido um resultado satisfatório (artigos pertinentes ao tema pesquisado). Para estabelecer relações entre as palavras-chave são utilizados termos como AND, OR, NEAR e NOT, que significam E, OU, PRÓXIMO e NÃO, respectivamente. Os termos podem ser escritos de forma parcial utilizando o \*, ou seja, apenas os seus radicais, para possibilitar uma pesquisa mais abrangente (ex: *nitrog\** ao invés de *nitrogen*). A língua inglesa foi utilizada para proporcionar um resultado com artigos de todo o mundo.

Inicialmente testou-se buscar as combinações de nomes de nutrientes associados a verbos de remoção/redução (Termos 2 e 3, ou simplesmente Termo 4, da Tabela 1) e um termo de tratamento de esgoto (Termo 5). Entretanto, devido à enorme quantidade de artigos e retorno de diversos artigos não pertinentes ao tema, optou-se por refinar a busca utilizando a necessidade do nome dos nutrientes no título (Termo 1) e inserindo filtros para eliminar efluentes não domésticos (Termo 6) e águas potáveis (Termo 7).

**Tabela 1: Matriz de palavras-chave utilizadas na expressão de busca.**

Termo 1	ligação	Termo 2	ligação	Termo 3	ligação	Termo 4	ligação	Termo 5	ligação	Termo 6	ligação	Termo 7
nitrog*	AND	nitrog*	near/1	remov*	OR	N-rem*	AND	wastewater treat*	NOT	industrial waste*	NOT	drinking water
phosp*		phosp*		reduc*		P-rem*		waste water treat*		pig* waste*		potable water
ammon*		ammon*		elimin*				sewage* treat*		swine waste*		
nitrous*		nitrous*		incorpor*				effluent* treat*		food waste*		
				adsorv*						pharmac*		
				recov*						biodiesel product*		
				recycl*								
				reintro*								
		recup*										
		transform*										

Título
Tópico
Tópico
Título
Tópico

Optou-se por realizar a pesquisa no período ao longo de seis anos recentes completos, de 2007 a 2012. A expressão de busca resultante da combinação dos termos está apresentada abaixo.

*Title=(((nitrog\* or phosp\* or ammon\* or nitrous\*))) AND Topic=(((nitrog\* or phosp\* or ammon\* or nitrous\*) near/1 (remov\* or reduc\* or elimin\* or incorpor\* or adsorv\* or recov\* or recycl\* or reintro\* or recup\*))) AND Topic=(((wastewater or "waste water" or sewage\* or effluent\*) near/1 treat\*)) NOT Title=(((industrial\* or pig\* or swine\* or food\*) near/1 (waste\* or sewage\* or effluent\*)) or ("biodiesel product\*" or pharmac\*)) NOT Topic=(((drinking or potable) near/1 water))*

Os artigos resultantes desta pesquisa foram analisados através de suas características (título, palavras-chave, resumo e, eventualmente, corpo do texto) para verificar se eram pertinentes ao tema de interesse. Esta validação considerou pertinente apenas os trabalhos voltados à remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto doméstico, não sendo incluídas as técnicas aplicadas para o tratamento de efluentes não domésticos (industriais, da agricultura, etc.). Também não foram considerados pertinentes ao tema os artigos que tratassem exclusivamente da recuperação de fósforo (sem abordar técnicas de remoção deste nutriente do esgoto) e aqueles que apresentassem técnicas de remoção de nutriente do lodo de esgoto.

Foi realizada uma análise geral contemplando a evolução temporal das publicações e os países, revistas e autores com mais publicações. Em seguida, foi realizada uma análise específica do tema, verificando o nutriente focado no artigo (nitrogênio, fósforo ou ambos), os princípios, os processos e as tecnologias aplicadas para remover nutrientes do esgoto sanitário. As quantificações e análises gráficas foram realizadas através de ferramentas disponíveis na plataforma WOS e utilização do aplicativo Excel.

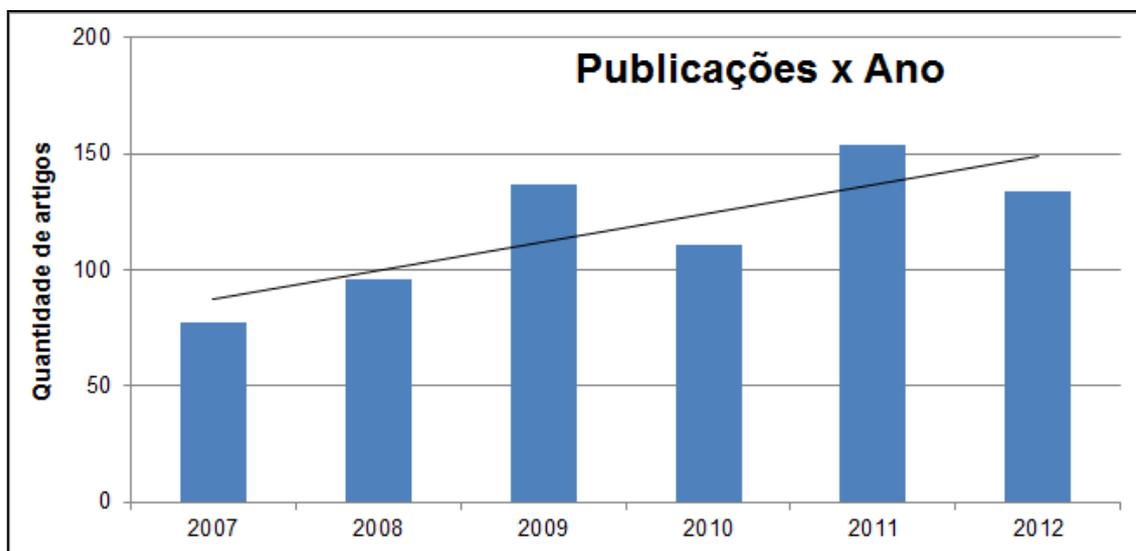
Com relação aos princípios, processos e tecnologias aplicadas para remover nutrientes do esgoto sanitário, foram estabelecidas as seguintes classificações, que serão detalhadas, juntamente com a discussão dos resultados:

- Processos de tratamento de esgoto de princípio Biológico estudados para a remoção de nutrientes;
- Processos de tratamento de esgoto de princípio Físico/Químico estudados para a remoção de nutrientes; e
- Tecnologias/técnicas pertencentes à categoria Outros.

**RESULTADOS**

A pesquisa selecionou uma amostra de 844 artigos no período de 01/01/2007 a 31/12/2012, sendo que 84% destes (ou 709 artigos) foram validados como pertinentes ao tema remoção de nutrientes do esgoto sanitário. Embora tenham sido utilizados filtros na expressão de busca, a maioria dos artigos não pertinentes ao tema de interesse era de tratamento de efluentes industriais e agrícolas (52% dos artigos não pertinentes ao tema).

Ao longo dos anos analisados observou-se que houve um aumento da quantidade de artigos publicados de 2007 a 2012, e que os anos com mais publicações neste tema foram os de 2009 e 2011 (Figura 1).



**Figura 1: Evolução temporal das publicações no período de Jan/2007 a Dez/2012.**

O país com a maioria das publicações no tema pesquisado foi a China (34 % dos artigos), seguida por EUA (13%) e Japão (7%) (Figura 2). O Brasil aparece em 13º lugar no ranking da quantidade de publicações no período analisado. Entretanto, como é possível verificar na Tabela 2, os dez artigos mais citados no período analisado são de países europeus (Portugal, Holanda, Turquia, Grécia e Alemanha), EUA, Austrália e Japão.

Este fato sugere que apesar de a China apresentar a maior quantidade de artigos publicados no período de 2007 a 2012, os artigos mais relevantes estão sendo realizados em países com maior tradição de desenvolvimento de tecnologias de saneamento (tais como EUA, Alemanha e Holanda).

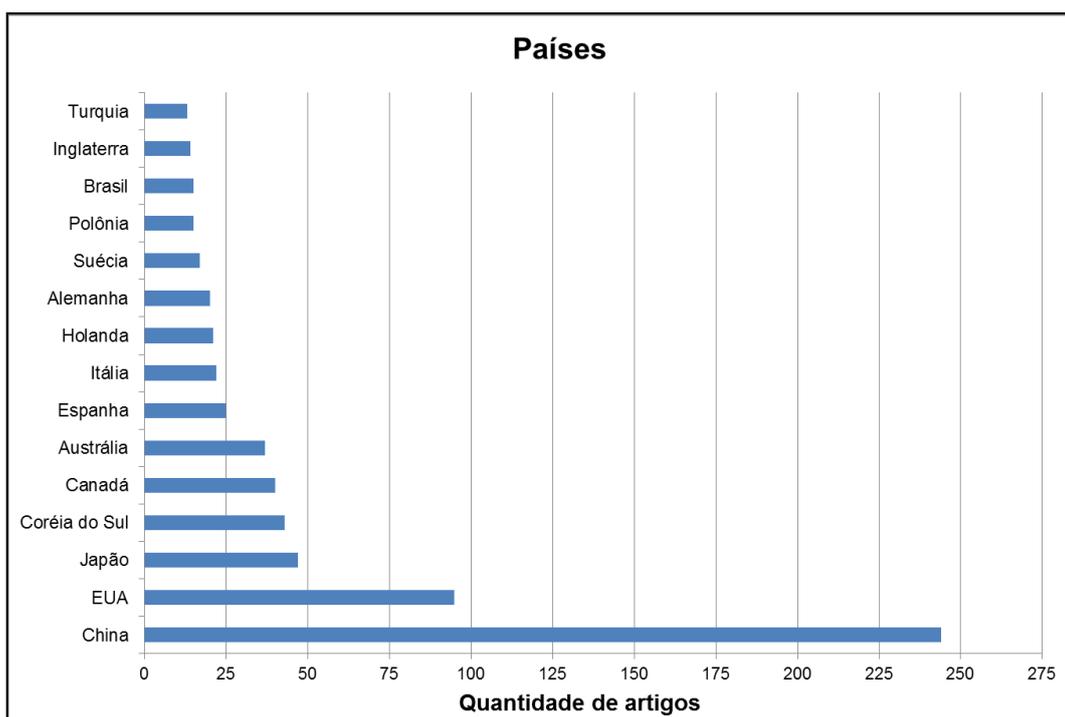
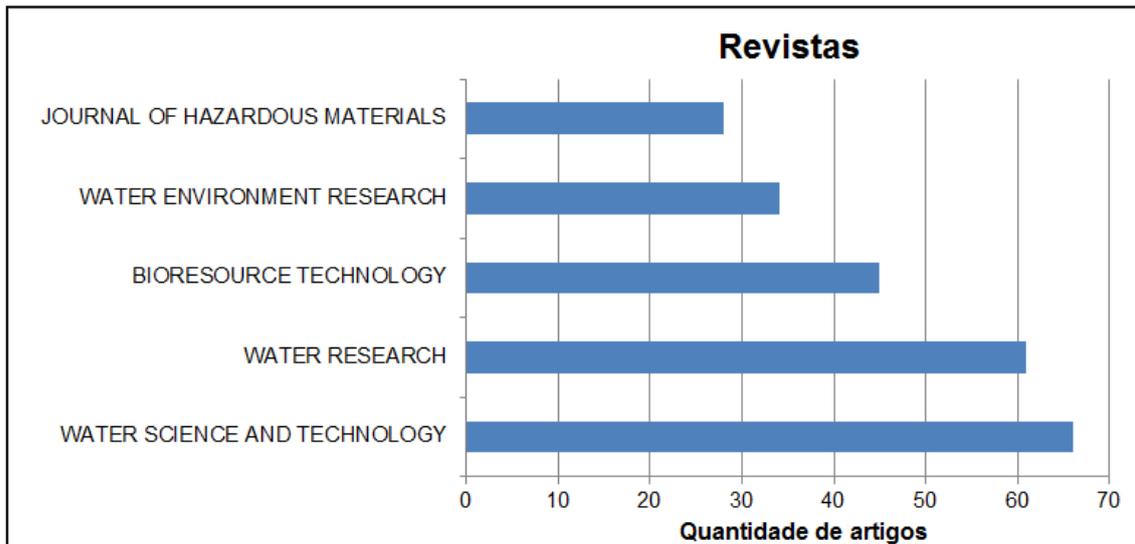


Figura 2: Países com mais publicações de artigos de remoção de nutrientes do esgoto sanitário.

Tabela 2: Artigos científicos mais citados no período analisado.

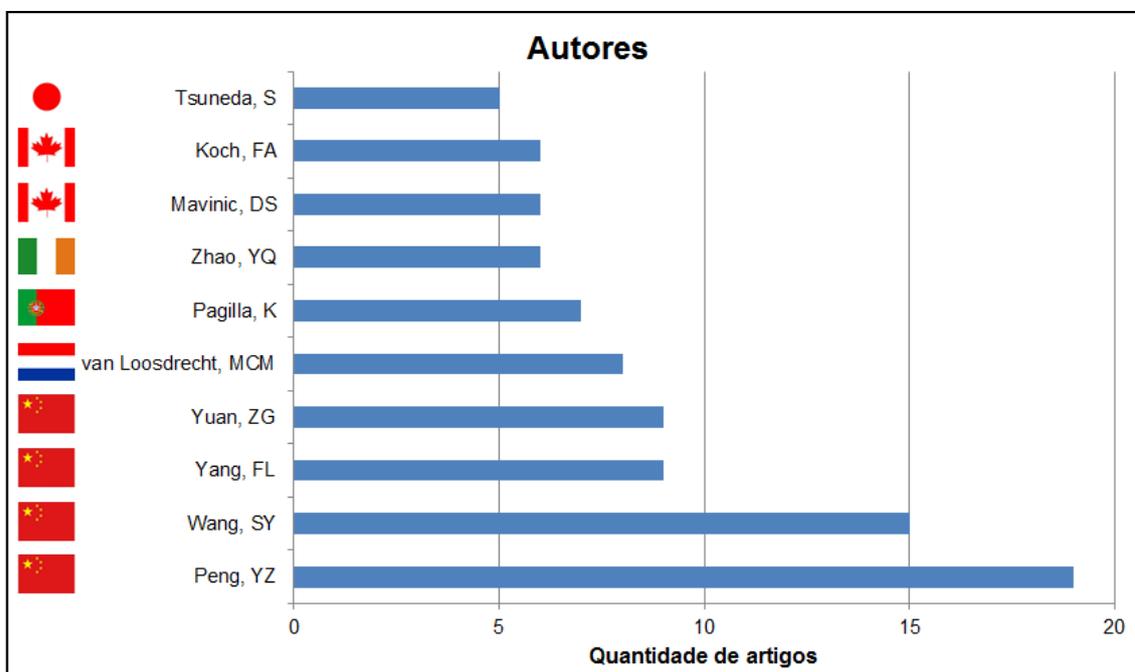
Título	Nº de vezes citado	Ano	País
Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale	159	2007	Portugal
Nitrous oxide emission during wastewater treatment	70	2009	Holanda
Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural Turkish (Yildizeli) zeolite for environmental quality	70	2007	Turquia
Removal of phosphate species from solution by adsorption onto calcite used as natural adsorbent	62	2007	Grécia
Hybrid anion exchanger for trace phosphate removal from water and wastewater	60	2007	EUA
Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal	58	2008	Austrália
New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment - A review	55	2007	Alemanha
Ammonia-oxidizing communities in a highly aerated full-scale activated sludge bioreactor: betaproteobacterial dynamics and low relative abundance of Crenarchaea	48	2009	EUA
High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions	42	2007	Japão
Demonstration of nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater	39	2008	Austrália

As quatro revistas com mais publicações neste tema são tipicamente de engenharia sanitária (“*Water Science and Technology*”, “*Water Research*”, “*Bioresource Technology*” e “*Water Environment Research*”) (Figura 3).



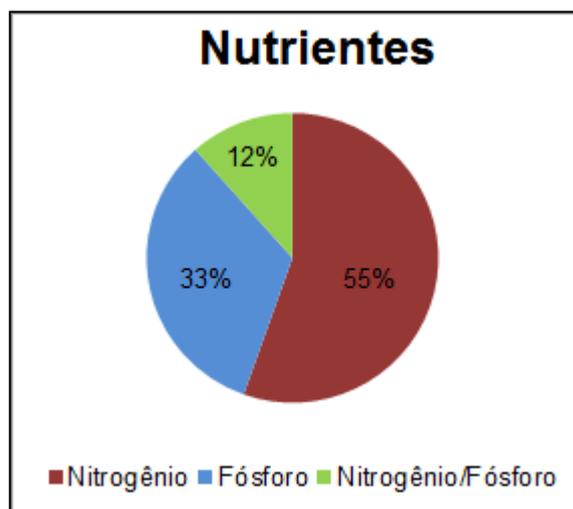
**Figura 3: Revistas com maiores quantidades de artigos de remoção de nutrientes do esgoto sanitário.**

Dentre os dez autores com mais publicações no período analisado, quatro são chineses, dois canadenses, um irlandês, um holandês, um português e um japonês (Figura 4). Este indicador apresenta dois aspectos interessantes: a) reforça que China é o país com a maior quantidade de artigos publicados (quatro primeiros autores em termos quantitativos); e b) o autor van Loosdrecht, primeiro autor depois dos chineses, é um pesquisador cujo foco principal de pesquisa recente é o Lodo Aeróbio Granular (tecnologia em ascensão que será descrita posteriormente).



**Figura 4: Autores com maiores quantidades de artigos de remoção de nutrientes do esgoto sanitário.**

A maioria dos artigos que relativos ao tema remoção de nutrientes focaram no nutriente Nitrogênio (aproximadamente 55% dos artigos), enquanto que 33% focaram na remoção de Fósforo e uma minoria (12%) na remoção de ambos (Figura 5).



**Figura 5: Nutrientes estudados nos artigos de remoção de nutrientes do esgoto sanitário.**

Conforme se pode observar, o nitrogênio se sobressaiu perante o fósforo, embora haja necessidade de evolução das técnicas de remoção de fósforo para solucionar problemas ambientais como a eutrofização dos corpos d'água e a tendência de escassez de fósforo no futuro (DE-BASHAN & BASHAN; 2004).

Uma possível justificativa para este fato é que as tecnologias aplicadas para a remoção e transformação de nitrogênio entre suas formas podem ser mais facilmente aplicadas, adotando técnicas consolidadas de tratamento de esgoto, tais como adaptações/melhorias nos processos de lodos ativados, alternâncias de processos aeróbios/anaeróbios (processos de múltiplos estágios), entre outros que serão apresentados posteriormente.

Por outro lado, para a remoção (e recuperação) de fósforo os processos largamente adotados nas ETEs são os físico/químicos (utilizando sais de metais, por exemplo), enquanto que novos processos biológicos de remoção de fósforo ainda são embrionários e altamente complexos (de mais difícil implantação em ETEs existentes).

Com base em livros, manuais (METCALF & EDDY, 2004; MOTA & VON SPERLING, 2009; EPA, 2008) e artigos de revisão bibliográfica (DE-BASHAN & BASHAN; 2004; PAREDES et al., 2007; GAO et al., 2011), foi definida uma hierarquia de princípios, processos e tecnologias para classificar os artigos. Os tópicos a seguir apresentam detalhes desta classificação, alguns conceitos e os resultados da quantificação realizada.

A primeira etapa da análise específica foi a classificação dos 709 artigos pertinentes ao tema, identificando o princípio de tratamento (Biológico ou Físico/Químico) para a remoção de nutrientes do esgoto sanitário.

Os processos de tratamento de esgoto que visam a remoção de nutrientes podem ser categorizados em dois princípios básicos de tratamento: Biológico e Físico/Químico. Os processos biológicos incluem desde processos consagrados de tratamento de esgoto, tais como processos de biomassa suspensa (lodos ativados, por exemplo) e sistemas naturais (lagoas de estabilização, por exemplo), até processos emergentes ainda principalmente utilizados em escala piloto e em laboratório (tais como lodo aeróbio granular e células biocombustíveis). Já dentro da categoria de princípio físico/químico estão, por exemplo, a precipitação química, as membranas e a troca iônica. As tabelas 3 e 4 apresentam os processos pertencentes aos princípios Biológico e Físico/Químico, respectivamente.

**Tabela 3: Processos de tratamento de esgoto de princípio Biológico estudados para a remoção de nutrientes.**

<b>Biológico</b>
Processos biológicos com biomassa aderida
Processos biológicos com biomassa suspensa
Processos biológicos emergentes
Processos biológicos híbridos
Processos biotecnológicos
Sistemas naturais

**Tabela 4: Processos de tratamento de esgoto de princípio Físico/Químico estudados para a remoção de nutrientes.**

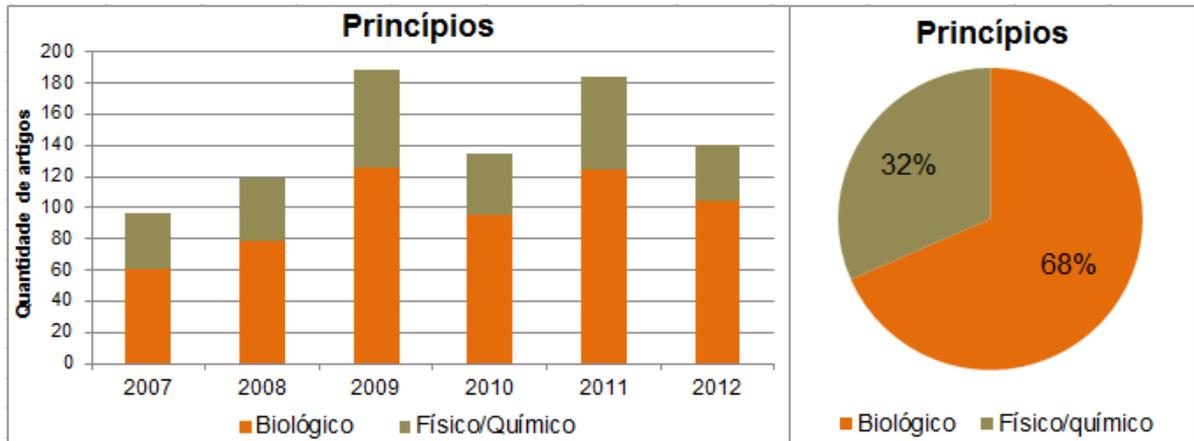
<b>Físico/Químico</b>
Adsorção e absorção
Arraste de ar
Filtração físico-química
Membranas
Microondas
Ozonização de lodo
Precipitação química
Separação magnética
Tratamento eletroquímico
Troca iônica
Ultrasom

Também retornaram na expressão de busca adotada artigos que tratavam de outros temas, tais como controle/otimização operacional, modelagem matemática, emissão de óxido nítrico e tratamento descentralizado (Tabela 5), sempre voltados à remoção de nutrientes do esgoto sanitário. Apesar destes temas não serem o principal alvo desta pesquisa, os artigos pertencentes à categoria 'Outros' apresentavam-se combinados com processos apresentados nas tabelas 3 e 4 e, portanto, foram considerados pertinentes e mantidos na análise.

**Tabela 5: Tecnologias/técnicas pertencentes à categoria Outros.**

<b>Outros</b>
Controle/otimização operacional
Emissão de óxido nítrico
Modelagem matemática
Monitoramento da remoção de nutrientes
Recuperação de nutrientes
Revisão bibliográfica
Tratamento descentralizado

O princípio Biológico foi o predominante para a remoção de nutrientes nos artigos científicos (68%), sendo que os processos Físico/Químicos foram minoria (32%). Não foi observada tendência de crescimento de um princípio em relação ao outro ao longo dos anos analisados, como é possível verificar na Figura 6.



**Figura 6: Quantidade de artigos publicados para remoção de nutrientes divididos por princípios de remoção.**

Os processos de tratamento de esgoto que visam a remoção de nutrientes foram subdivididos em diversas tecnologias que apareceram na pesquisa realizada. Todas estas tecnologias estão apresentadas nas tabelas 6 a 7, que resumem a classificação realizada nesta pesquisa.

**Tabela 6: Tecnologias de tratamento de esgoto de princípio Biológico estudados para a remoção de nutrientes.**

<b>Biológico</b>
<b>Processos biológicos com biomassa aderida</b>
Biodisco
Reator biológico com leito fixo
Reator biológico com leito móvel
<b>Processos biológicos com biomassa suspensa</b>
Lodos ativados convencional
Processos em múltiplos estágios
UASB
Valo de oxidação
<b>Processos biológicos emergentes</b>
Biosorção e bioaugmentação
Célula combustível
Lodo granular aeróbio
Novos processos de transformação do nitrogênio
<b>Processos biológicos híbridos</b>
<b>Processos biotecnológicos</b>
Bactérias
Fungos
Microalgas
Remoção biológica avançada de fósforo (EBPR)
<b>Sistemas naturais</b>
Lagoas de estabilização
Sistema de infiltração
Wetlands

**Tabela 7: Tecnologias de tratamento de esgoto de princípio Físico/Químico estudados para a remoção de nutrientes.**

<b>Físico/químico</b>
<b>Adsorção e absorção</b>
Absorção
Adsorção
Zeólito
<b>Arraste de ar</b>
<b>Filtração físico-química</b>
<b>Membranas</b>
<b>Microondas</b>
<b>Ozonização de lodo</b>
<b>Precipitação química</b>
Estruvita
Com sais de metais
<b>Separação magnética</b>
<b>Tratamento eletroquímico</b>
<b>Troca iônica</b>
<b>Ultrassom</b>

Os processos mais estudados para remoção de nitrogênio foram os processos biológicos emergentes, os processos biológicos com biomassa suspensa, os sistemas naturais, os processos biotecnológicos e os processos com biomassa aderida (Figura 7). Para remoção de fósforo, os processos mais estudados foram os processos biotecnológicos, a precipitação química, a absorção e adsorção, os processos biológicos com biomassa suspensa e os sistemas naturais (Figura 8).

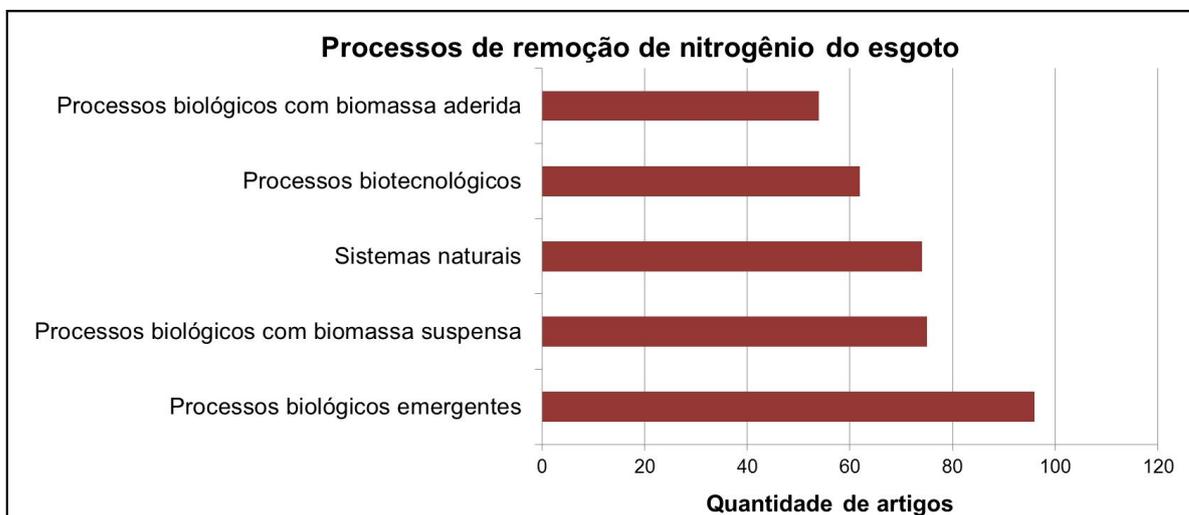


Figura 7: Processos com mais publicações para remoção de nitrogênio.

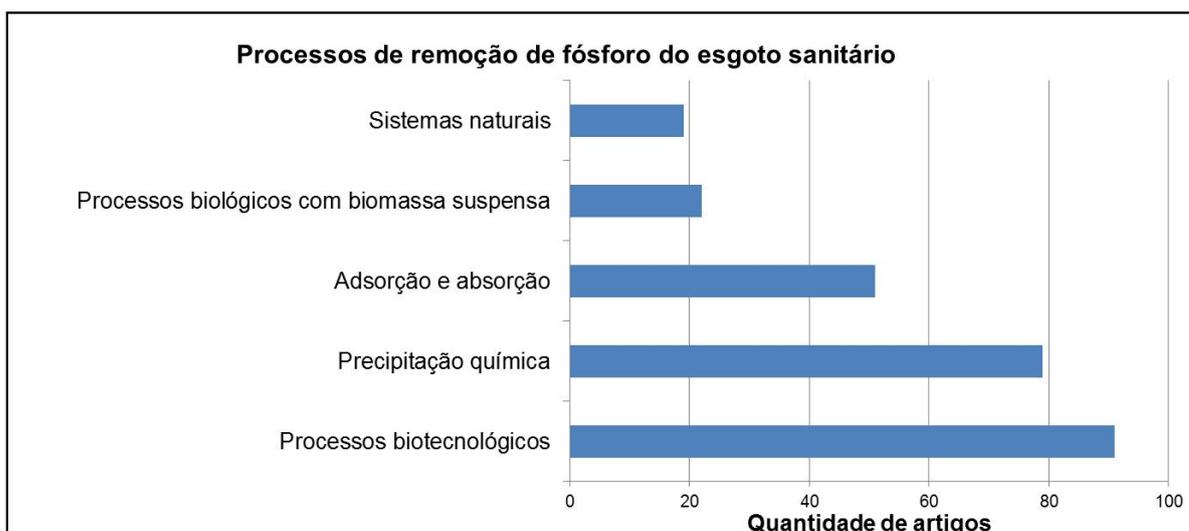
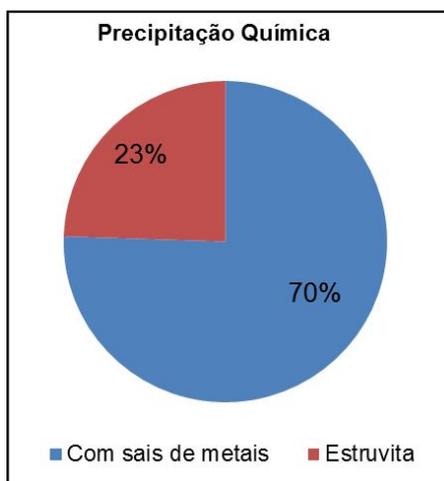


Figura 8: Processos com mais publicações para remoção de fósforo.

Alguns aspectos interessantes desta quantificação devem ser destacados:

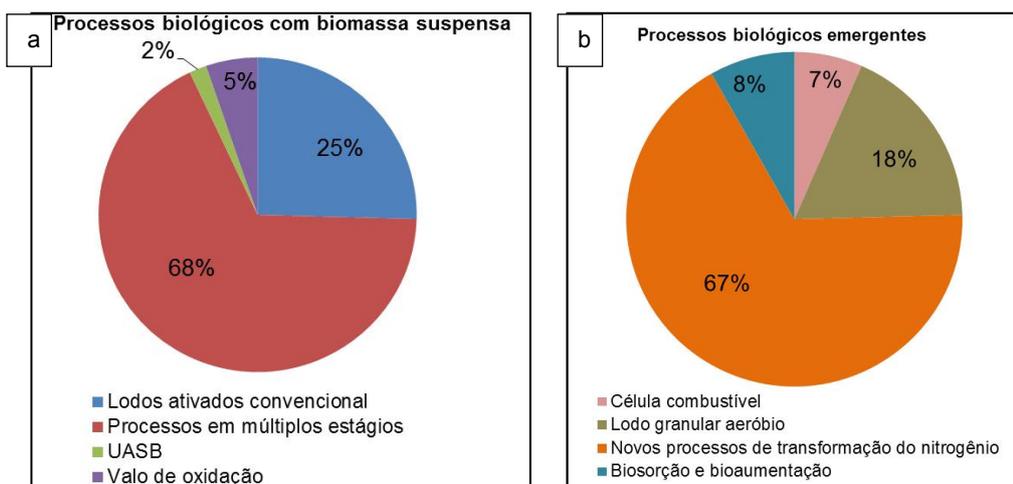
- Para remoção de fósforo, a precipitação química ainda é um dos processos predominantes. Estão inseridas nesta categoria, duas tecnologias principais: precipitação com sais de metais e Estruvita (Figura 9). A precipitação com sais de metais (de ferro, alumínio, por exemplo) é a técnica mais difundida comercialmente para remoção de fósforo do esgoto sanitário, entretanto, pesquisas continuam a ser realizadas para refinamento de técnicas de dosagem e aplicação de novos materiais/compostos, e por isso é maioria no processo de precipitação química (70%). A técnica de Estruvita consiste na precipitação espontânea do composto  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  através da adequação de certas condições para que este processo ocorra (tais como ajustes no pH e na concentração de sólidos suspensos). Esta

técnica é altamente vantajosa por possibilitar a recuperação do fósforo para sua futura aplicação na agricultura como fertilizante (DE-BASHAN & BASHAN, 2004).



**Figura 9. Quantificação das tecnologias do processo de precipitação química.**

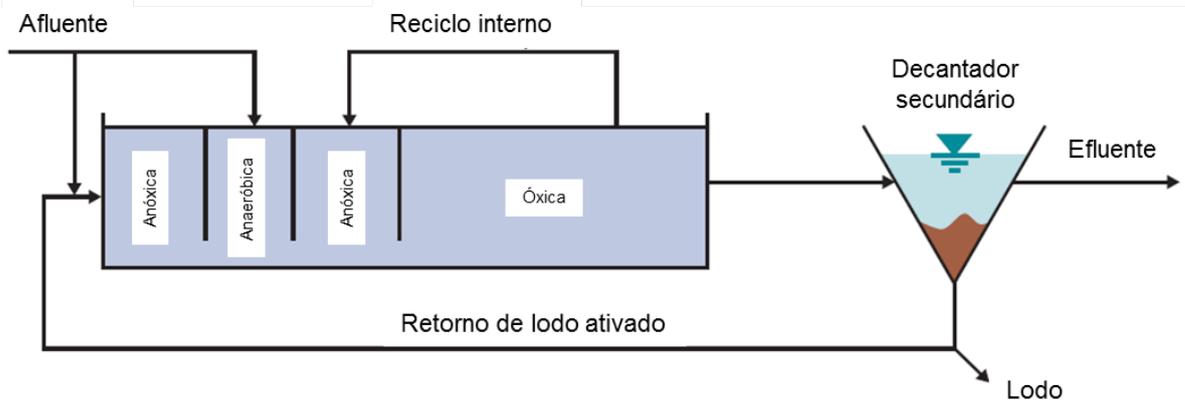
- Para remoção de nitrogênio, os processos biológicos emergentes predominaram, demonstrando que a comunidade científica está buscando tecnologias que sejam capazes de remover o nitrogênio (em todas as suas formas) dos esgotos, e não apenas transformar sua composição. As atuais estações de tratamento, especialmente as brasileiras, são de nível secundário e propiciam condições apenas para a nitrificação (transformação de amônia a nitrito e de nitrito a nitrato). No entanto, existe uma tendência de busca por técnicas que propiciem também a desnitrificação (transformação de nitrato a nitrogênio gasoso), seja através da combinação de processos de múltiplos estágios (fases anaeróbias/anóxicas/aeróbias), por meio de novos processos de transformação de nitrogênio (Desnitrificação/Nitrificação simultânea, remoção via nitrito) ou em tecnologias emergentes que ainda são principalmente aplicadas em escala de bancada (Lodo Aeróbio Granular) (Figura 10);



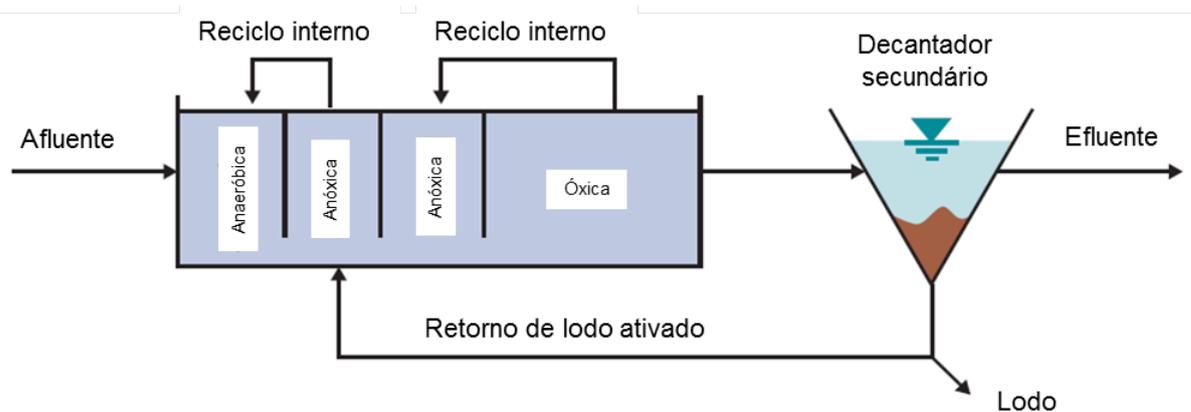
**Figura 10: Quantificação das tecnologias dos a) Processos biológicos com biomassa suspensa e b) Processos biológicos emergentes.**

- Conforme se observa no gráfico da Figura 10a, a tecnologia predominante no processo biológico com biomassa suspensa são os de múltiplos estágios, as quais são combinações de estágios biológicas anaeróbias, anóxicas e aeróbias que envolvem recirculações de lodo e de efluente (fonte de nitrato) entre os reatores.

São exemplos deste processo: Bardenpho (de três – Figura 11 –, quatro e cinco estágios), A2/O (Anaeróbio/Anóxico/Óxico), A/O (Anaeróbio/Óxico), UCT (University of Cape Town), MUCT (Modified University of Cape Town – Figura 12), entre outros;



**Figura 11: Fluxograma do processo Bardenpho de três estágios.**  
**Fonte: adaptado de EPA, 2008.**



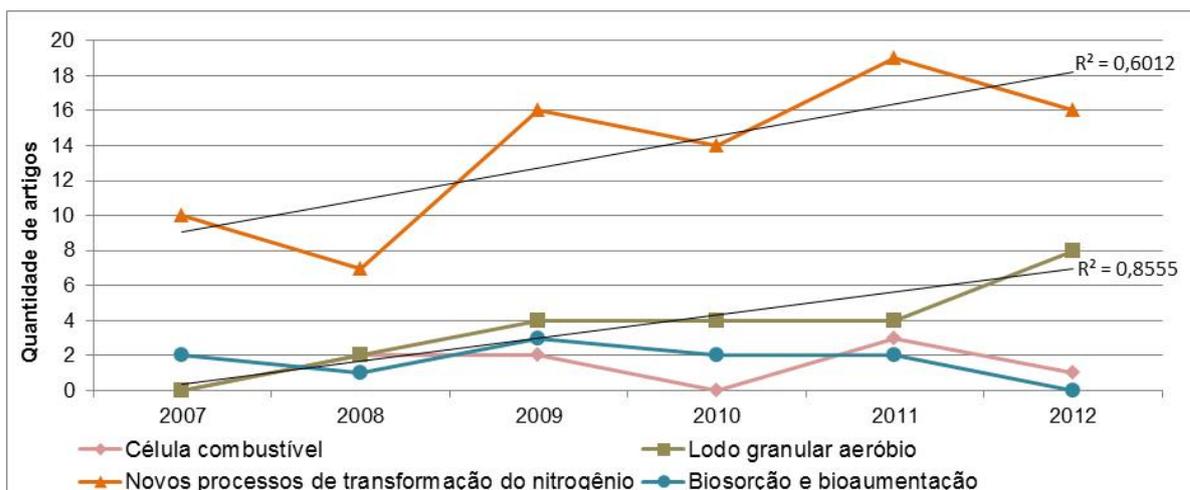
**Figura 12: Fluxograma do processo MUCT (Modified University of Cape Town).**  
**Fonte: adaptado de EPA, 2008.**

- Dentre os processos emergentes, a tecnologia mais estudada foram os novos processos de transformação do nitrogênio. Esta envolvem técnicas de conversão nitrogênio por novos caminhos, de forma a proporcionar economias energéticas (possibilidade de redução da aeração) e de área. São exemplos destas técnicas: SND (*Simultaneous Nitrification-Denitrification*), ANAMMOX, Nitrificação parcial, SHARON (*Single Reactor Systems for High Ammonium Removal Over Nitrite*), Deamonificação anaeróbia/anóxica, OLAND (*Oxygen Limited Autotrophic Nitrification-Denitrification*), CANON (*Completely Autotrophic Nitrogen Removal Over Nitrite*). A Tabela 8 apresenta uma síntese das reações químicas destes processos de transformação de nitrogênio.

**Tabela 8. Reações químicas de conversão do nitrogênio.**  
**Fonte: adaptado de Paredes et al., 2007.**

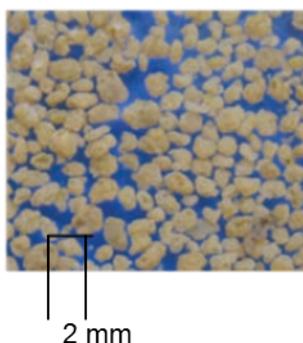
Processo	Conversão bioquímica
Nitrificação	$\text{NH}_4^+ + 1.5 \text{O}_2 + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
Nitratação	$\text{NO}_2^- + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$
Nitrificação	$\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3^- + 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
Desnitratação	$2 \text{NO}_3^- + \text{C} \rightarrow 2 \text{NO}_2^- + \text{CO}_2$
Desnitrificação via nitrito	$4 \text{NO}_2^- + 3 \text{C} + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 4 \text{HCO}_3^-$
Desnitrificação	$4 \text{NO}_3^- + 5 \text{C} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{N}_2 + 4 \text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$
Nitrificação parcial (conversão de 50%)	$\text{NH}_4^+ + 0.75 \text{O}_2 + \text{HCO}_3^- \rightarrow 0.5 \text{NO}_2^- + 0.5 \text{NH}_4^+ + \text{CO}_2 + 1.5 \text{H}_2\text{O}$
Anammox (sem síntese celular)	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Anammox (com síntese celular)	$\text{NH}_4^+ + 1.32 \text{NO}_2^- + 0.066 \text{HCO}_3^- \rightarrow 1.02 \text{N}_2 + 0.26 \text{NO}_3^- + 0.66 \text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} + 2.03 \text{H}_2\text{O}$
Nitrificação – Desnitrificação tradicional	$\text{NH}_4^+ + 8 \text{O}_2 + 5 \text{C} + 4 \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{N}_2 + 9 \text{CO}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$
CANON	$\text{NH}_3 + 0.85 \text{O}_2 \rightarrow 0.11 \text{NO}_3^- + 0.44 \text{N}_2 + 0.14 \text{H}^+ + 1.43 \text{H}_2\text{O}$
OLAND	$\text{NH}_4^+ + 0.75 \text{O}_2 \rightarrow 0.5 \text{N}_2 + \text{H}^+ + 1.5 \text{H}_2\text{O}$

- Já sobre as tecnologias de lodos ativados convencional e valos de oxidação apareceram artigos de otimização e modelagem matemática nos sistemas para proporcionar a remoção de nitrogênio. Um exemplo é o trabalho de Kim et al. (2011) em que os autores ajustaram parâmetros operacionais (idade do lodo e razão de recirculação interna) para proporcionar a transformação de nitrogênio no reator. Já um exemplo de trabalho de modelagem matemática de lodos ativados é o de Makinia et al. (2011).
- Não é usual ver um artigo de UASB relacionado entre as tecnologias que removem nitrogênio, tendo em vista que este processo anaeróbio não tem a característica de remoção de nutrientes. Entretanto, os artigos relacionados a esta tecnologia combinaram UASB com outros processos de tratamento (lodos ativados – CAO & ANG, 2010 - e lagoas de estabilização – ARAUJO et al., 2010).
- A análise da evolução temporal dos artigos de processos emergentes permitiu identificar tecnologias em ascensão (Figura 13).



**Figura 13: Evolução temporal dos artigos publicados sobre processos biológicos emergentes.**

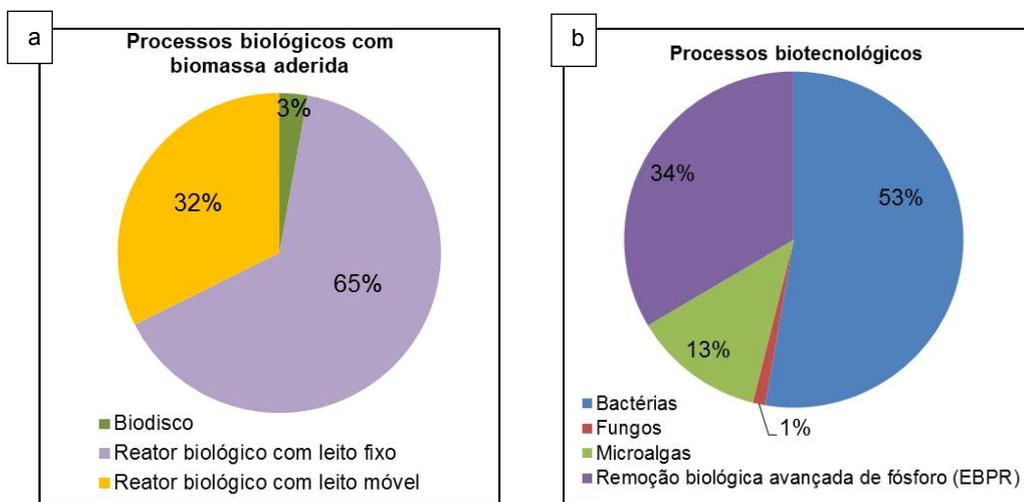
- Uma delas é o Lodo Aeróbio Granular, que pode ser definido como um consórcio microbiano, autoimobilizado, principalmente constituído por bactérias aeróbias e facultativas (GAO et al., 2011). Os Granulos Aeróbios (Figura 14) têm sido cultivados em sistemas em batelada ainda em escala de bancada e piloto (existe apenas uma estação de tratamento em escala real operando na Holanda desde 2012). Os esforços de pesquisa têm focado nas condições de cultivo, fatores que influenciam a granulação (start up) e nas características da comunidade microbiana do lodo aeróbio granular. O principal país que tem estudado este assunto é a Holanda, e alguns estudos também têm sido realizados na Singapura e na China.



**Figura 14. Fotografia de Grânulos aeróbios.**  
Fonte: GAO et al., 2011.

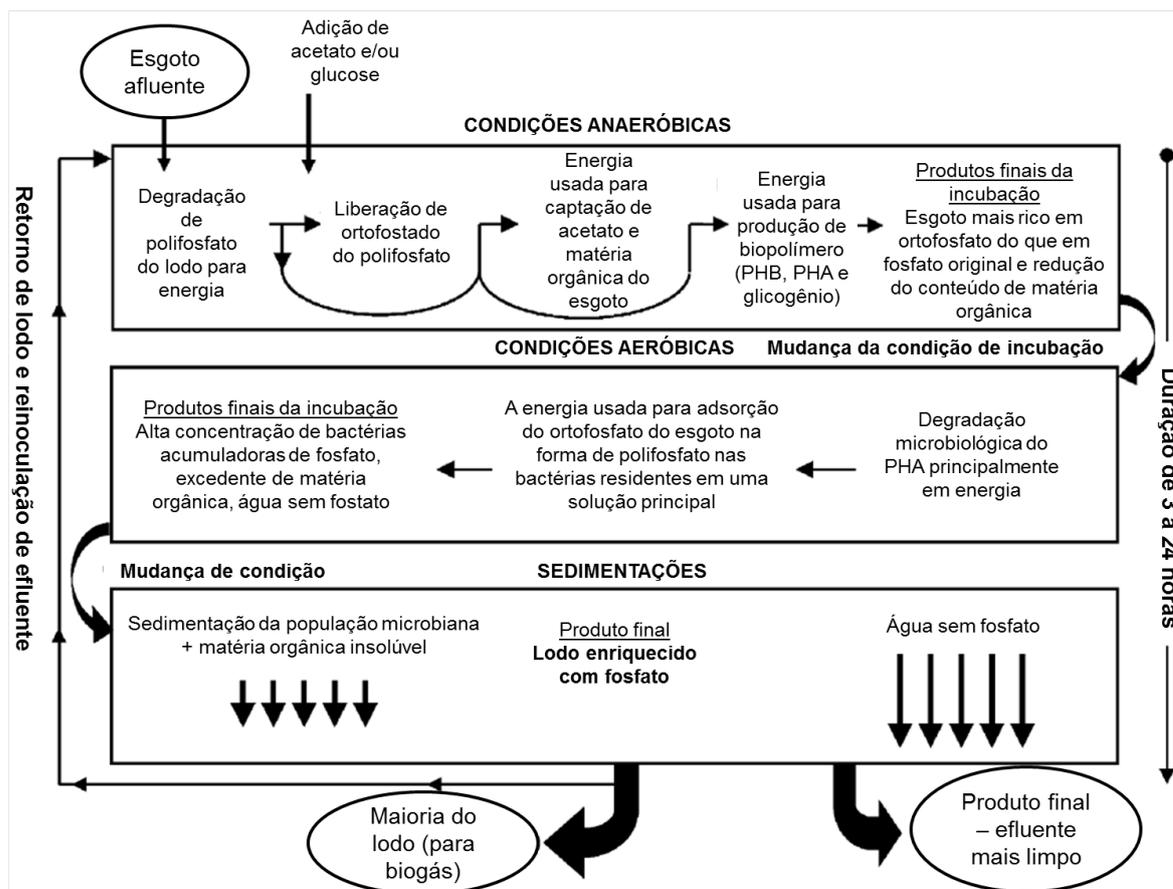
- Algumas das vantagens do Lodo Aeróbio Granular são:
  - Alta velocidade de sedimentação: depende do tamanho e da densidade de grânulos, podendo atingir 50 a 90 m/h (enquanto que a velocidade sedimentação do lodo floculento é de 7 a 10 m/h);
  - Longo tempo de retenção de lodo: o que é especialmente favorável a bactérias nitrificantes e ANAMMOX;
  - Zonas aeróbias e anóxicas estão presentes no interior dos grânulos, possibilitando a ocorrência de diferentes processos biológicos no mesmo sistema (como SND, Nitrificação parcial e reação ANAMMOX);
  - Aplicável para o tratamento de vários efluentes e capaz de aguentar choques de carga devido a estrutura dos grânulos e alta concentração de biomassa no reator.

- Algumas das limitações do Lodo Aeróbio Granular são:
  - Difícil *Start up* (processo que em geral demora mais de dois meses);
  - A alimentação do efluente do sistema batelada deve ser homogênea e sem agitação para preservar os grânulos;
  - Difícil de regular o tamanho dos grânulos (parâmetro importante diretamente relacionado à eficiência do sistema).
- Os processos biotecnológicos também apareceram em uma grande quantidade de artigos, inclusive liderando as publicações para remoção de fósforo. Este fato deve-se ao interesse da comunidade científica no processo EBPR (Enhanced Biological Phosphorus Removal). Os processos biotecnológicos foram segregados em quatro categorias (Figura 15b): bactérias, microalgas, fungos e EBPR (este foi mantido em separado para destaque deste novo método de remoção de fósforo).



**Figura 15: Quantificação das tecnologias dos a) Processos biológicos com biomassa aderida e b) Processos biotecnológicos.**

- O EBPR é um processo de tratamento de esgoto baseado no enriquecimento seletivo das bactérias acumuladoras de polifosfato inorgânico como um ingrediente para suas células (DE-BASHAN & BASHAN; 2004). Este enriquecimento é obtido alternando as condições de incubação entre uma fase anaeróbia rica em carbono (sem oxigênio e nitrato) seguido por uma fase aeróbia pobre em carbono. A modelagem conceitual do processo EBPR está representada na Figura 16.



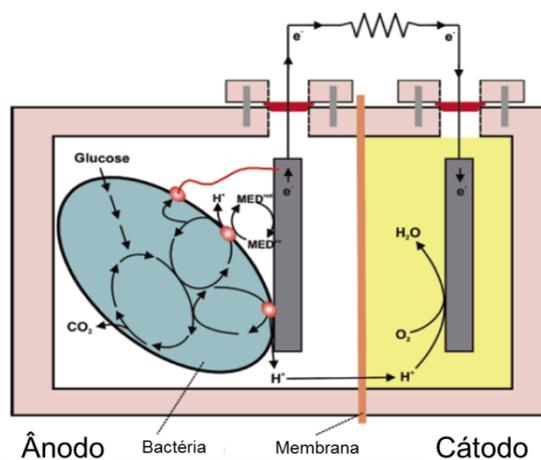
**Figura 16. Modelagem conceitual do processo EBPR.**  
**Fonte: Adaptado de de-Bashan & Bashan (2004).**

- Como se pode verificar na Figura 15b, as tecnologias que envolveram bactérias na remoção de nutrientes foram maioria. Os estudos relacionados a esta categoria são de favorecimento do desenvolvimento de bactérias específicas, seu isolamento e inoculação nos sistemas de reatores para promover a remoção de nitrogênio e fósforo (Yang et al., 2011);
- Dentre os processos biológicos de biomassa aderida, lideraram os reatores de leito fixo (65% - Figura 15a), tais como os filtros biológicos aerados submersos e os filtros biológicos percoladores;
- Os processos de sistemas naturais tiveram grande destaque para a remoção de ambos os nutrientes (fósforo e nitrogênio), principalmente devido a grande ocorrência de Wetlands (Figura 17). Os Wetlands, que representam 88% dos artigos destes sistemas, possuem diversas denominações (terras úmidas construídas, leitos cultivados, leitos com macrófitas, etc.) e consistem em um processo de tratamento em que o esgoto escoar em contato com as raízes e os rizomas das plantas aquáticas (especialmente dos gêneros Typha, Juncos, Scirpus, Carex e Phragmites). Os Wetlands construídos podem ser categorizados em: fluxo horizontal superficial; fluxo horizontal subsuperficial; e fluxo vertical (MOTA & VON SPERLING, 2009).



**Figura 17: Quantificação das tecnologias dos Sistemas Naturais.**

- Uma tecnologia emergente que apareceu em alguns artigos é a célula biocombustível (*Microbial Fuel Cell*), as quais convertem a energia da matéria orgânica em energia elétrica utilizável e utiliza as bactérias para catalisar a transferência de elétrons de um doador de elétrons (neste caso a matéria orgânica) a um eletrodo anódico (conforme ilustra a Figura 18 – LOGAN et al., 2006). Entretanto, esta tecnologia ainda está em escala de bancada, não tendo aplicação em escala real por enquanto.



**Figura 18: Princípio operacional das células biocombustíveis. Fonte: adaptado de Logan et al. (2006).**

## CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são:

- Apesar de a China ser o país líder em quantidade de publicações, os artigos mais relevantes (com o maior número de citações no período analisado) são de países de mais tradição no desenvolvimento de tecnologias de tratamento de esgoto (como Alemanha e Holanda);
- O nutriente mais estudado foi o Nitrogênio, sendo que nos países subdesenvolvidos (da Ásia, América do Sul e Central) são os que mais estão estudando este nutriente, provavelmente devido à possibilidade de adaptação de processos consolidados e em operação. Nos países

desenvolvidos, em especial os da Oceania (i.e., Austrália), o fósforo tem tido maior importância recentemente;

- Verificou-se grande interesse da comunidade técnico científica nos novos processos de transformação do nitrogênio, como a SND, o que é especialmente importante para as companhias brasileiras que desejam readequar suas ETEs de nível secundário para proporcionar a remoção de nitrogênio;
- O processo biotecnológico de EBPR também teve destaque no período pesquisado, demonstrando o interesse dos pesquisadores na remoção biológica de fósforo para facilitar a recuperação deste nutriente; e
- Finalmente, as tecnologias em ascensão e que se recomenda estudo mais aprofundado são: Lodo Aeróbio Granular, Processos Biotecnológicos, os novos processos de transformação de nitrogênio e os Wetlands construídos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, J. C. et al. "Investigation of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria presence in a small full-scale wastewater treatment system comprised by UASB reactor and three polishing ponds". *Water Science & Technology*, vol. 61, n. 3, p. 737-745, 2010.
2. CAO, Y. S.; ANG, C. M. "Coupled UASB-activated sludge process for COD and nitrogen removals in municipal sewage treatment in warm climate". *Water Science & Technology*, vol. 60, n. 11, p. 2829-2839, 2010.
3. DE-BASHAN, L. E.; BASHAN, Y. "Recent advantages in removing phosphorus from wastewater and its future as fertilizer (1997-2003)". *Water Research*, vol. 38, p. 4222-4246, 2004.
4. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). "Emerging technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management". 2008.
5. GAO, D. et al. "Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment". *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 31, p. 137-152, 2011.
6. KIM, Y. M. et al. "Influence of operational parameters on nitrogen removal efficiency and microbial communities in a full-scale activated sludge process". *Water Research*, vol. 45, p. 5785-5795, 2011.
7. LOGAN et al. "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology". *Environmental Science and Technology*, vol. 40, n. 17, p. 5181-5192, 2006.
8. MAKINIA, et al. "Modeling organic nitrogen conversions in activated sludge bioreactors". *Water Science & Technology*, vol. 63, n. 7, p. 1418-1426, 2011.
9. METCALF & EDDY. "Wastewater engineering: treatment and reuse". McGraw-Hill, 4 ed. 1819p, 2004.
10. MOTA, F.S.B.; VON SPERLING, M. "Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção". Rio de Janeiro: ABES, 428p, 2009.
11. PAREDES, D. et al. "New aspects of Microbial Nitrogen Transformations in the Context of Wastewater Treatment – A Review". *Eng. Life Sci.*, vol. 7, n. 1, p. 13-25, 2007.

12. SALLES-FILHO, S. L. M. & ZACKIEWICZ, M. "Prioridades de Pesquisa para Suínos e Aves". Revista TeC Carnes, v.3, n.1, p.1-6, 2001.
13. YANG, X. et al. Isolation and nitrogen removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Bacillus subtilis* A1. Bioresource Technology, vol. 102, p. 854-862, 2011.